



TAMPEREEN TEKNILLINEN YLIOPISTO  
TAMPERE UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

JUUSO TULONEN  
SÄILIÖPUOLIPERÄVAUNUN TAKA-AKSELISTON KIINNITYKSEN  
ANALYSOINTI  
Diplomityö

Tarkastaja: professori Asko Ellman,  
professori Arto Lehtovaara  
Tarkastaja ja aihe hyväksytty  
Teknisten tieteiden  
tiedekuntaneuvoston kokouksessa  
9. syyskuuta 2014

## TIIVISTELMÄ

TAMPEREEN TEKNILLINEN YLIOPISTO

Konetekniikan koulutusohjelma

**TULONEN, JUUSO:** Säiliöpuoliperävaunun taka-akseliston kiinnityksen analysointi

Diplomityö, 58 sivua, 12 liitesivua

Elokuu 2014

Pääaine: Koneiden ja järjestelmien suunnittelu

Tarkastaja: professori Asko Ellman, professori Arto Lehtovaara

Avainsanat: Venymämittaus, teli, analysointi, väsyminen, säiliöpuoliperävaunu, alumiini, hitsisauman murtuma

Opinnäytetyössä tutkitaan syitä alumiinisen säiliöpuoliperävaunun rakenteessa ilmenevään ongelmaan. Alumiinisen vaunun telissä sijaitsevassa hitsisaumassa esiintyy toistuvasti käytön aikainen murtuma. Murtumia on esiintynyt vastaavalla alueella kyseisessä vaunumallissa useassa eri vaunussa.

Ongelmaa tarkastellaan sekä venymäliuskamittauksin että tietokonemallinnuksin. Teoreettisin menetelmin tarkastellaan saumojen kestäminen staattisessa tilanteessa. Tutkimuksen alussa FEM – analyysillä tarkasteltiin rakennetta ja etsittiin pisteet, joissa suoritettiin tulevat venymämittaukset. FEM-mallinnuksilla tarkasteltiin myös telialustan käyttäytymistä erilaisissa ajon aikaisissa tilanteissa.

Venymäliuskamittauksilla selvitettiin kuinka suuria jännityshuippuja rakenteessa ajon aikana ilmenee ja onko tämä syynä saumojen murtumaan. Mittausten perusteella tarkasteltiin rakenteen herkkyyys väsymismurtumalle. Ajon aikana toteutetussa mittauksessa havaittiin suuria yksittäisiä jännityshuippuja, mutta jännityshuiput eivät ylittäneet alumiinin murtorajaa.

Asiakasyritykselle tuotettiin rakenteen muutosehdotus. Muutosehdotuksen tietokonemallia analysoitiin FEM-mallia apuna käyttäen. Muutosehdotuksessa pyrittiin korjaamaan rakenteen heikot alueet, saaden uudesta rakenteesta mahdollisimman kestävä murtumia vastaan.



## ABSTRACT

TAMPERE UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

Master's Degree Programme in Mechanical Engineering

**TULONEN, JUUSO:** Analysis of rear axle mounting in a tanker semi-trailer

Master of Science Thesis, 58 pages, 12 Appendix pages

August 2014

Major: Design of machines and systems

Examiner: Professor Asko Ellman, Professor Arto Lehtovaara

Keywords: Stress measurement, strain measurement, axle mounting, fatigue, tanker semi-trailer, aluminum, weld failure

The subject of this Master of Science thesis was a problem with aluminum tanker semi-trailer. A repeated fracture appears in rear axle mounting of the trailer.

This problem was analyzed with strain gage measurements and computer modelling. In the beginning of analysis FEM –model was used to find areas with fracture sensitivity to place strain gages in. FEM-model was also used to study behavior of the axle mounting under load.

Strain gage measurements were used to find out the magnitude of stress during operation and if this is the reason for the weld failures. Using recorded data fatigue analysis was performed. Large peak stress points were detected, but they weren't larger than ultimate stress of aluminum.

Alternative structure of the mounting was designed to the target firm. Model of the alternative structure was analyzed using FEM-modeling. The goal was to improve the weak areas of the existing structure, making the structure as failure resistant as possible.

## ALKUSANAT

Diplomityö sai alkunsa syksyllä 2013, kun Eurotank Oy:n toimitusjohtaja Rainer Vänni etsi diplomityöntekijää. Yrityksen säiliöpuoliperävaunumallissa oli pitkään ilmennyt ongelmia, jotka haluttiin ratkaista. Jo diplomityön alkuvaiheessa päätettiin suorittaa venymäliuskamittaus osana työtä.

Venymäliuskamittaus toteutettiin Norjassa huhtikuun alussa. Paikan päällä mittauksiin käytettiin kuljetusliike Martinsenin perävaunua. Rainer Vänni oli mukana mittauksista toteuttamassa ja on ollut suuressa roolissa diplomityön edistämisessä sekä rakenteen uudelleen suunnittelussa. Mittauksia edeltävällä viikolla laitteiden toimintaa testattiin Uudenmaan alueella kuljetusliike Saarisen perävaunuilla.

Diplomityön ohjaajina toimivat professori Asko Ellman sekä Arto Lehtovaara. Heidän lisäksi Juha Miettinen on ollut valtavana apuna mittauksen suunnittelussa. Eurotankin henkilökunta ja suunnittelijat olivat erittäin avuliaita tarjotessaan apua sekä dokumentteja. Kiitos kaikille diplomityön tekemisessä avustaneille.

Henkilökohtaisesti haluan kiittää perhettäni Johannaa, Leilaa, Riikaa sekä eteenkin isääni Markku Tulosta, joka on ollut kannustamassa koko opintojeni ajan ja jonka vaikutuksesta olen alun perin päätenyt konetekniikan pariin. Suuri kiitos myös veljelleni Lauri Tuloselle, joka oli avustamassa Suomessa koelaitteistoa asennettaessa.

---

Juuso Tulonen  
Tampereella 13.8.2014

# SISÄLLYS

1	Johdanto .....	1
2	Säiliöpuoliperävaunun rakenne .....	2
2.1	Telialusta .....	3
2.1.1	Konsoli .....	4
2.1.2	Pystylevy takapään konsoleihin .....	5
2.2	Vetopää .....	6
2.3	Säiliö .....	6
3	Venymäliuskamittaus .....	8
3.1	Venymäliuska .....	8
3.1.1	Erilaiset venymäliuskatyypit .....	8
3.2	Venymämittauksen periaate .....	10
3.3	Wheatstonen silta .....	11
3.4	Yksiliuskainen silta .....	13
3.5	Puolisilta .....	14
4	Väsymistarkastelu .....	16
4.1	Väsyttävät kuormat .....	16
4.2	Rainflow -menetelmä .....	16
4.3	Minerin hypoteesi .....	17
5	Ongelman esittely .....	19
5.1	Väsyminen .....	19
6	Venymäliuskamittaus .....	21
6.1	Venymäliuskamittauksen suunnittelu .....	21
6.2	Mittauspisteet .....	21
6.3	Mittauksen toteutus .....	25
6.4	Ensimmäisen mittauksen tulokset .....	25
6.4.1	Mittaus 1.1 – vaunu tyhjä .....	25
6.4.2	Mittaus 1.2 – vaunu lähes täysi .....	26
6.4.3	Mittaus 1.3 – vaunu puolillaan .....	29
6.4.4	Mittaus 1.4 – vaunun tyhjennys .....	30
6.5	Toisen mittauksen tulokset .....	33
6.6	Väsymisanalyysi .....	36
6.6.1	Ajovuoron aikaiset syklit .....	37
6.6.2	Kumulatiivinen vaurio .....	38
6.7	Johtopäätökset .....	40
7	FEM-mallinnus .....	41
7.1	Vaunun painosta aiheutuvat jännitykset .....	41
7.2	Vaihtoehtoisten rakenteiden analysointi .....	41
7.2.1	Kuormitukset .....	42
7.2.2	Nykyinen rakenne .....	42
7.2.3	Uudistettu rakenne .....	44

8 Yhteenveto .....	48
Lähteet.....	50

## TERMIT JA NIIDEN MÄÄRITELMÄT

$\sigma$	Normaalijännitys
$\varepsilon$	Suhteellinen venymä. Venymän suhde lähtöpituuteen.
$\sigma_{\max}$	Maksimijännitys
$\sigma_{\min}$	Minimijännitys
$\sigma_w$	Vaihtojännitys
$\sigma_w$	Mittapisteiden jännitys. Jännitys vaunun rakenteessa, sen ollessa kuormattomana ja levossa.
$\nu$	Poissonin luku
$e_0$	Wheatstonen sillan mittaajännite
$D$	Minerin teorian mukainen kumulatiivinen vaurio.
$E_s$	Wheatstonen sillan syöttöjännite
$g$	Putoamiskiihtyvyys. $g=9,81 \text{ m/s}^2$
$k$	Liuskavakio
$N_{fi}$	Rakenteen kestoikä vakioamplitudisella kuormituksella
$n_i$	Jännitysvaihteluluokka $i$ :n jännitysjaksojen lukumäärä Minerin hypoteesissa.
$R_G$	Venymäliuskan resistanssi
$\Delta R_G$	Mittauksen aikainen resistanssin muutos
$R_E$	Materiaalin murtoraja
$R_M$	Materiaalin myötöraja
Aktiivinen liuska	Mittauksessa käytössä oleva venymäliuska
Dummy liuska	Lämpötilakompensointiin käytetty venymäliuska
FEM –analyysi	Finite Element Method. Tietokone avusteinen mallinnusmenetelmä, jolla saadaan selvitettyä jännitykset ja venymät rakenteessa.
Joustinlevy	Konsolin ja säiliön vaipan välissä sijaitseva levy.
Loiskeseinä	Reiällinen seinä, joka hidastaa nesteiden liikettä ajon aikana. Seinä sallii eri puolilla seinää olevien nesteiden sekoittumisen.
Konsoli	Telialustaa tukeva kolmiosainen kotelopalkki
Konsolin keskiosa	Keskimmäinen konsolin kolmesta osasta. Osa sijaitsee pystylevyjen välissä.
Konsolin kylkiosa	Pystylevyjen ulkopuolella sijaitseva konsolin osa.
Minerin teoria	Menetelmä, jolla voidaan laskea eri jännitystasojen aiheuttama kumulatiivinen vauriota
Normaalijännitys	Kappaleen sisäisen voimajakauman tiheys
Puoliperävaunu	Vähintään yksiakselinen perävaunu, jonka akselit sijaitsevat vaunun peräpäässä
Puristustykytys	Jännitysvaihtelua, joka tapahtuu puristusjännityksen alueella

Pystylevy	Rakennelevy telialustassa
Rainflow-analyysi	Menetelmä jolla luokitellaan mittaustuloksia suuruus luokittain
Suhteellinenvenymä	Pituuden muutoksen suhde alkuperäiseen pituuteen
Telialusta	Rakenne säiliön rungon sekä telin ripustusten välillä
Telin kiinnityslevy	Pystylevyn pohjaan hitsattava levy, johon teli kiinnitetään ruuviliitoksella
Vaihtojännitys	Jännitysvaihtelua puristuksen ja vedon välillä
Vetotykitys	Jännitysvaihtelua, joka esiintyy kokonaan vedon puolella
Venymäliuska	Materiaalin venymän mittaamiseen käytetty anturi
Väliseinä	Tehtävänä on estää eri osastoissa olevien nesteiden sekoittuminen
Wheatstonen silta	Menetelmä vastuksen resistanssin selvittämiseksi

# 1 JOHDANTO

Asiakasyritys on vuonna 1983 perustettu Eurotank Oy, jonka toimipiste sijaitsee Kangasalla. Yritys suunnittelee sekä valmistaa laajaa mallistoa säiliöitä sekä säiliöperävaunuja ja niihin liittyviä järjestelmiä. Eurotank Oy on osa Hollantilaista Burg-konsernia, joka on Euroopan suurin säiliöajoneuvojen valmistaja.

Diplomityön lähtökohtana oli asiakasyrityksen säiliöpuoliperävaunun telialustan rakenteissa ilmenevä hitsisauman murtuma. Vika ilmenee järjestelmällisesti kyseisessä vaunumallissa muutaman vuoden käytön jälkeen. Tavoitteena oli analysoida ongelman syitä sekä tuottaa analyysin perusteella rakenteen muutosehdotus asiakasyritykselle.

Analyysin tärkeimpänä työvälineenä oli käytössä olevaan vaunuun suoritettu venymäliuskamittaus. Mittauksella pyrittiin selvittämään sauman pettämisen syyt ja saadun tiedon avulla pohtimaan muutoksia rakenteeseen. Johtuen vaunujen vähäisestä käytöstä Suomessa mittaus suoritettiin Norjassa Oslon ympäristössä 7.-8.4.2014, jossa kuljetusliike Martinsenin säiliöpuoliperävaunu oli käytettävissä mittauksia varten. Mittauksilla pyrittiin selvittämään mahdolliset rakennetta vaurioittavat jännityshuiput sekä tutkimaan väsymisen osuus vaurioon. Mittausanalyysin lisäksi vaunua tutkittiin käyttäen hyväksi FEM-mallinnusta. FEM –malleilla tutkittiin ainoastaan staattisia tilanteita.

Työn alussa päätettiin työn tavoitteet ja päädyttiin selvittämään murtumisen syytä sekä miettimään muutosehdotusta asiakasyritykselle. Venymäliuskamittauksista suunniteltaessa käytettiin tukena vaunusta tehtyä tietokonemallia ja suurimman kiinnostuksen kohteeksi nousi murtuvan hitsisauman alue. Mittausten toteuttamisen jälkeen tuloksia tarkasteltaessa otettiin huomioon myös FEM-mallista saatu data. Näiden pohjalta suunniteltiin uusi rakenne, jossa ongelmat pyrittiin minimoimaan ja säilyttämään hyvä valmistettavuus.

## 2 SÄILIÖPUOLIPERÄVAUNUN RAKENNE

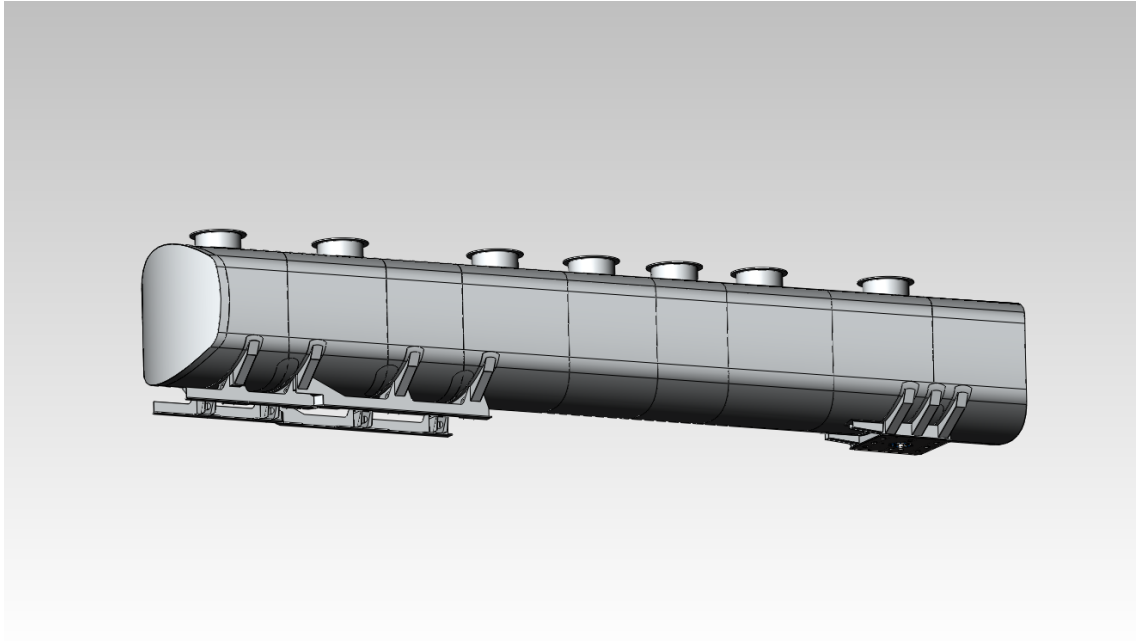
Säiliöpuoliperävaunuja käytetään pääasiallisesti nesteiden kuljetukseen. Myös jauhomaisten aineiden sekä kaasujen kuljetus on mahdollista, mikäli vaunu on tähän käyttöön suunniteltu.

Tässä projektissa analysoidaan hieman alle 13 metriä pitkää kolmeakselista nesteiden siirtoon suunniteltua säiliöperävaunua, jollainen on esitetty kuvassa 2.1. Vaunun ja nesteen suurin sallittu yhteismassa on 43000 kg. Vaunu on jaettu väliseinillä 7 erilliseen osastoon. Osastojen tilavuus vaihtelee 4 m<sup>3</sup> ja 11 m<sup>3</sup> välillä, suurimman nesteen kokonaistilavuuden ollessa 47 m<sup>3</sup>. Kussakin osastossa voi säilyttää eri nesteitä kuljetuksen aikana. Kaksi suurinta osastoa on jaettu rei'ällisillä loiskeseinillä kahteen osaan, jotta nesteen liike ei vaikeuta kuljetusta. Kuvassa 2.2 on esitetty työssä käytetty tietokonemalli. Osa epäoleellisista koteloista sekä tikkaat on jätetty mallintamatta, jotta malli pysyy helposti käsiteltävänä.



**Kuva 2.1.** Kuva Eurotank Oy:n valmistamasta säiliöpuoliperävaunusta



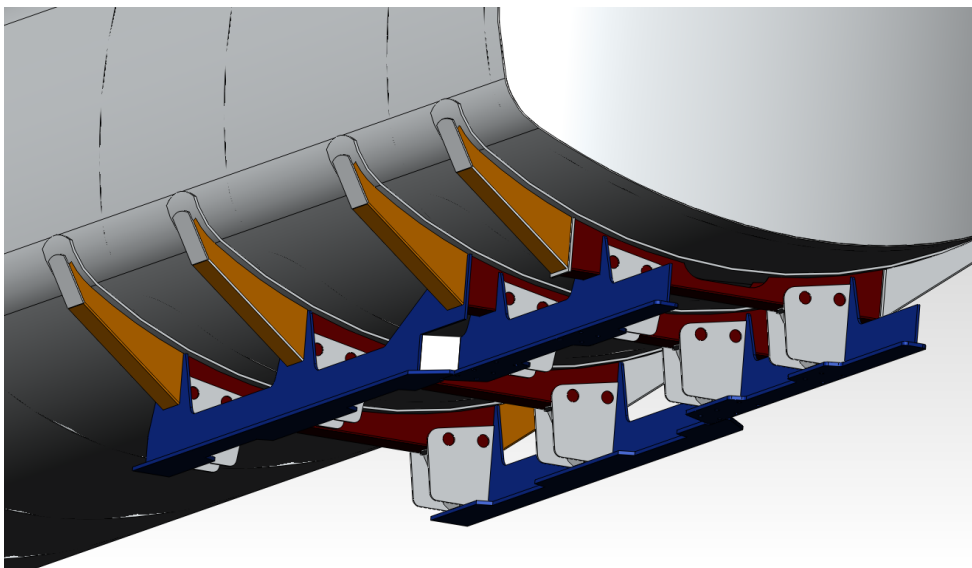


**Kuva 2.2.** Diplomityössä käytetty tietokonemalli

## 2.1 Telialusta

Telialustalla tarkoitetaan osaa, joka välittää vaunun kolmen akselin kiinnitykseltä voimat säiliön runkoon. Kaikki akselit ovat ilmajousitettuja. Takimmainen akseli on kääntyvä. Etummaisen akselin voi nostaa ilmaan siirron ajaksi, mikäli perävaunussa ei ole suurta kuormaa. Tutkittavan vaunun telialusta on levyrakenteinen.

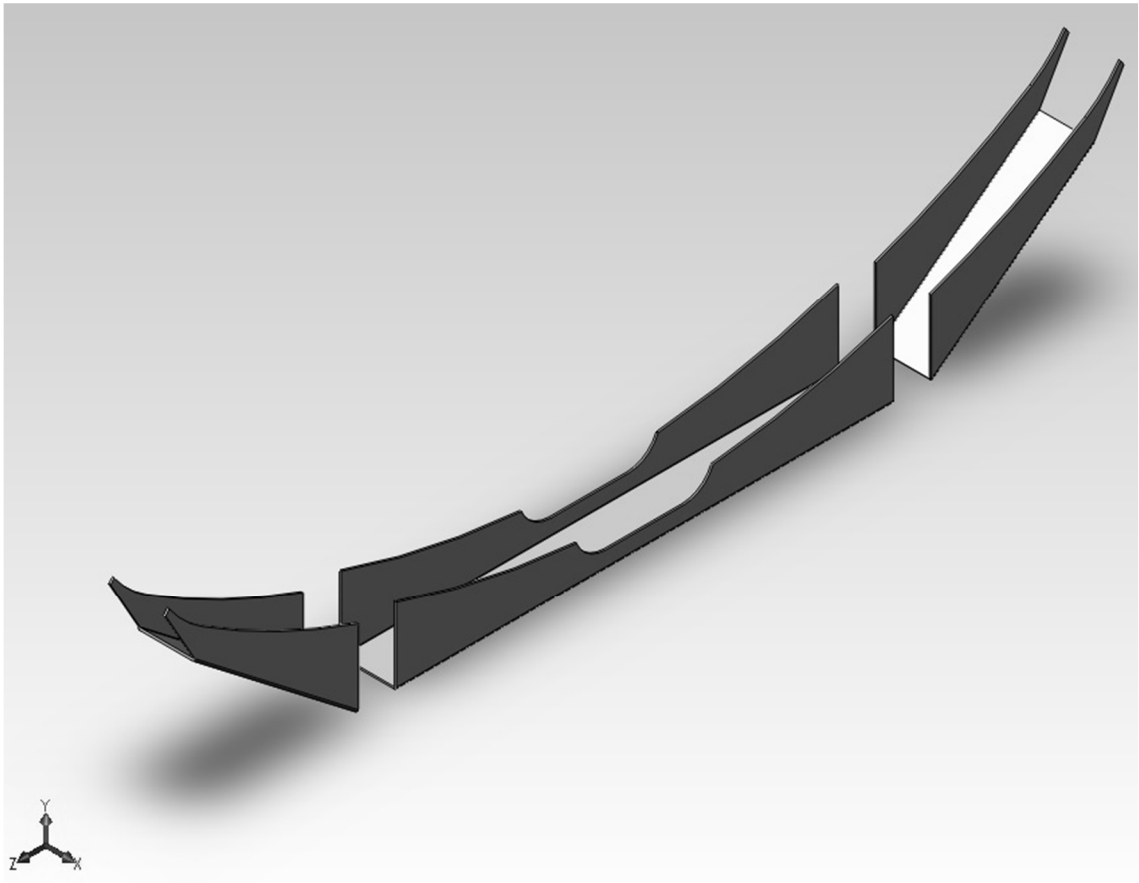
Telialustan rakenne ja siihen kuuluvat osat on esitetty erivärisinä kuvassa 2.3. Keltainen on nimeltään konsolin kylkiosa ja punainen konsolin keskiosa. Sininen on pystylevy. Rakenne esitellään yksityiskohtaisemmin alla. Diplomityössä tarkasteltava ongelma esiintyy telialustassa. Etummaisen konsolin kiinnittävä hitsisauma murtuu käytön aikana.



**Kuva 2.3.** Havainnekuva telin rakenteesta vaunun alapuolelta kuvattuna

### 2.1.1 Konsoli

Konsolit ovat muotoon leikattuja levyjä, jotka kantataan U – palkeiksi. Esimerkki konsolista on esitetty kuvassa 2.4. Leikkauksella konsoli saadaan sopimaan säiliön pohjan muotoon. Tutkittavan vaunun konsolit ovat kolmiosisaisia. Keskellä on konsolin keskiosa ja reunoilla ovat konsolin kylkiosat. Konsolin materiaali on AW-AlMg4,5Mn0,4 (5182 H111).



**Kuva 2.4.** Räjätyskuva konsoleista. Konsolin keskiosassa on kolo putkien läpivientiä varten.

Rakenteeltaan hieman toisistaan eroavia konsoleita sijaitsee vaunussa keulassa vetonupin tuella, keskivaiheilta seisontatuella sekä telissä. Tässä opinnäytetyössä tarkastellaan telialustan konsoleita.

Telialustassa on neljä lähes identtistä konsolia. Ainoastaan keskiosassa on vähäisiä eroja johtuen putkivedoista. Konsolien etäisyydet perävaunun pituussuunnassa vaihtelevat 960 mm ja 1475 mm välillä. Konsolin keskiosan leveys on 1310 mm.

Kuvassa 2.4 näkyy konsolin keskiosan sijainti kylkisiin nähden. Näiden väliin tulee pystylevy, johon konsolit hitsataan kiinni vastakkaisille puolille. Pystylevy esitellään kappaleessa 2.1.2.

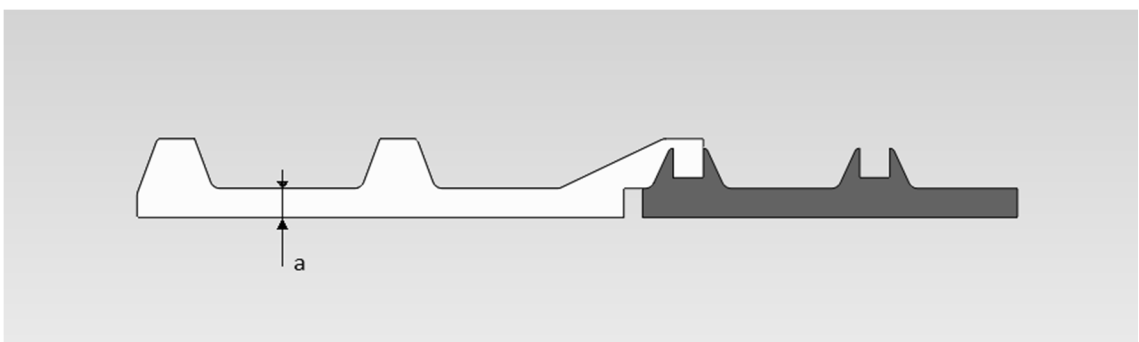
Säiliön vaippaan ulkopuolelle hitsataan kaarevaksi valssattu alumiininen levy. Nämä joustinlevyt sijaitsevat konsolien kohdalla ja konsolit hitsataan joustinlevyihin kiinni. Tarkoitus on jakaa konsoleilta saapuva kuormitus suuremmalle alalle. Levy mukaillee säiliön alapinnan muotoa. Levy on nähtävissä kuvassa 2.5.



**Kuva 2.5.** Kuva konsolin rakenteesta. Vaunu on eri mallia, kuin työssä tutkittu. Huomaa joustinlevy.

### 2.1.2 Pystylevy takapään konsoleihin

Pystylevy yhdistää toisiinsa telin kiinnityksen ja konsolit. Pystylevyyn hitsataan kiinni keski- ja kylkikonsolit sekä niiden tukilevyt. Konsolit kiinnitetään siten, etteivät ne ole kosketuksessa säiliön pohjaan eivätkä joustinlevyyn. Tässä lienee eräs avaintekijä vaunussa ilmeneviin ongelmiin. Kuvassa 2.6 on pystylevyt katsottuna vaunun vasemmalta kyljeltä.



**Kuva 2.6.** Käytössä oleva pystylevyn rakenne

Molemmilla laidoilla sijaitsee symmetrisesti asennetut pystylevyt. Pystylevyn rakenne on kaksiosainen. Johtuen takimmaisesta kääntyvän akselin tilantarpeesta on taaemmat levyt asennettu kapeammalle välille.

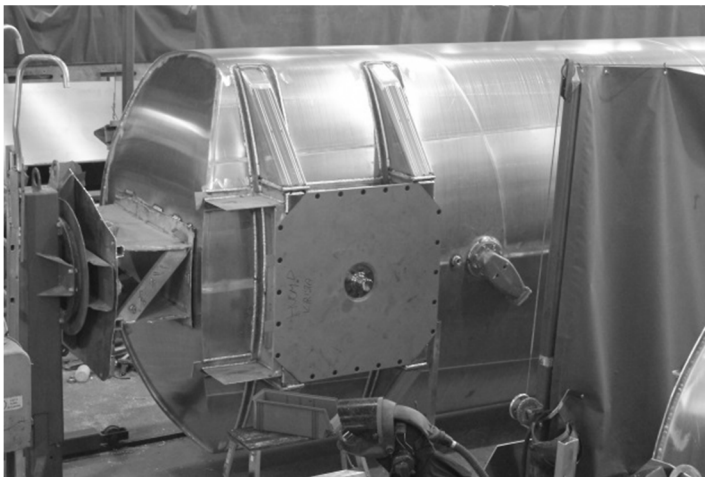
Pystylevyn materiaalina on AlMg3 ja vahvuus 10 mm. Etummaisena pystylevyparin etäisyys on 1310 mm, joka on kuvassa 2.6 esitetty valkoisella. Taaempien levyjen keskinäinen etäisyys on 1040 mm (tumma).

Ennen tämän projektin aloitusta rakennetta pyrittiin vahvistamaan, jotta sauman murtumisongelmasta päästäisiin. Kuvan 2.6 mittaa a kasvatettiin 120 millimetristä 150 millimetriin. Muutoksen vaikutus oli päinvastainen, hitsisauman kestoikä lyheni arviolta viidestä kolmeen vuoteen.

Akselien ripustukset kiinnitetään pystylevyn alapintaan kohtisuorasti hitsattuihin telin kiinnityslevyihin. Kyseinen levy on vaakatasossa. Levyn materiaali AlMg3, paksuus 15 mm.

## 2.2 Vetopää

Vetonuppi sijaitsee säiliön etupäässä. Konsolien osalta vetonupin kiinnityksen rakenne säiliöön on hyvin samanlainen kuin telissä. Kiinnitys toteutetaan kolmella konsolilla, joihin on hitsattu vetolevy. Vetolevyssä on ruuveilla kiinnitetty DIN 2” vetotappi. Vetolevyn suojana on kulutuslevy, jollainen näkyy kuvassa 2.7.



**Kuva 2.7.** Pienemmän säiliöpuoliperävaunun mallin kaksi konsolinen etupään kiinnitys

## 2.3 Säiliö

Säiliö on itsekantava rakenne. Rakenne toimii sekä säiliönä että vaunun runkona. Säiliön vaippa valmistetaan valssaamalla tasossa päittäin yhteen hitsatut levyt säiliön poikkileikkauksen muotoon. Kuvassa 2.8. on säiliön vaippa valssattavana.

Ennen valssaamista levyjen päädyt on leikattu muotoon, jotta kaarevat päätylevyt sopivat paikalleen. Valssaamisen jälkeen profiilin poikkileikkaus on hieman ellipsimäinen ja levyn avoimet reunat hitsataan yhteen. Samassa työvaiheessa leikataan reiät putkivedoille ja miesluukuille.



**Kuva 2.8.** Säiliön vaippa NC –valssissa

Loiske- ja väliseinät hitsataan paikalleen pystyyn käännetyssä vaipassa. Kaikki säiliön sisäiset seinät ovat kaarevia. Kuten kuvan 2.9 väliseinät. Säiliön materiaalina on 5 mm levy AlMg4,5Mn0,4.



**Kuva 2.9.** Väli- ja loiskeseiniä valmiina asennukseen

## 3 VENYMÄLIUSKAMITTAUS

Venymäliuskamittausta käytetään välineenä tutkittavan rakenteen eri tilanteiden kuormitusten selvittämisessä. Analyysissa tarkastellaan väsymistä, jännitysvaihtelua sekä jännityshuippuja. Tunnettaessa kuormitukset on rakennetta mahdollista muuttaa siten, että rakenne on kykenevä täyttämään sille asetetut vaatimukset. Mittaustuloksia ja mitattua dataa käsitellään kappaleessa 7.

### 3.1 Venymäliuska

Venymäliuskan rakenne on kolmiosainen. Rakenne koostuu alustasta, hilasta sekä pinnalla olevasta laminaattikalvosta. Alustan tärkein tehtävä on siirtää mitattavan kohteen venymä mahdollisimman tarkasti mittaavaan elementtiin. Tämän vuoksi alusta yleensä liimataan kiinni tutkittavaan kohteeseen. Yleisimmin kiinnityksessä käytetään syanoakrylaatti perustaista liimaa [3].

Hilassa metallifolio tai metallilanka on mittaava elementti. Koejärjestelyn antureissa on käytössä metallifolio. Kyseessä on ohut ritilämäinen resistiivinen elementti, jonka paksuus on 3-6  $\mu\text{m}$ . Toiminta perustuu elementin ohenemiseen sitä venytettäessä, jolloin langan resistiivisyys kasvaa. Langan resistiivisyyttä tarkkailemalla voidaan arvioida, kuinka suuria venymiä anturissa tapahtuu.

Laminaattikalvon tärkein tehtävä on pitää alumiinifolio alustassa kiinni. Kalvo myös suojaa anturia lialta ja kosteudelta.

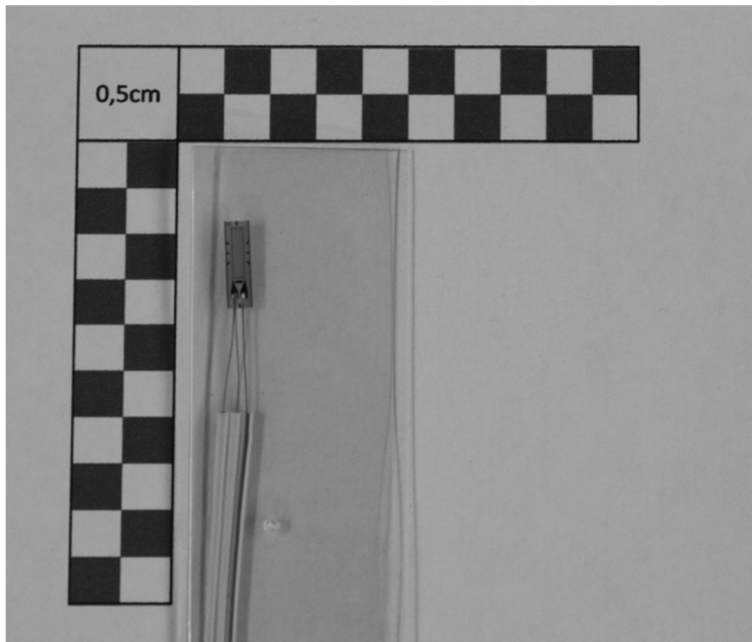
#### 3.1.1 Erilaiset venymäliuskatyypit

Venymäliuskoja on käyttökohteen mukaan yksihilaisia, kulmaliuskoja sekä delta-liuskoja. Kyseisessä projektissa on käytössä yksihilaisia sekä kulmaliuskoja.

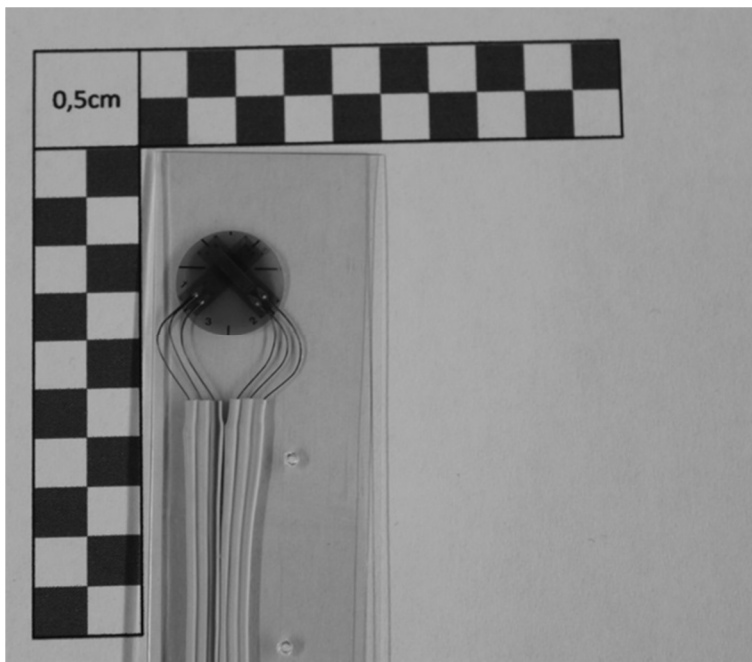
Yksihilainen liuska mittaa venymää ainoastaan yhden akselin suuntaan, eikä yksittäisellä liuskalla saada selville mittaushetkellä ilmenevää kokonaisjännitystä. Yksihilainen venymäliuska on esitetty kuvassa 3.1. Kokonaisjännitys voidaan saavuttaa käyttämällä useampaa yksihilaista liuskaa. Usein yksihilaista anturia käytetään, jos tilanne jännityksen suhteen tunnetaan etukäteen, kuten sauvan vetotilanteessa.

Kulmaliuskoilla saadaan selville kokonaisjännityksen suuruus, mutta ei suuntaa. Kulmaliuskassa kaksi hilaa on kytketty  $90^\circ$  kulmaan toisiinsa nähden. Suurin osa koejärjestelyn antureista on kulmaliuskoja. Kuvassa 3.2 on kulmaliuska. Mittaavat hilat ovat usein sijoitettu päällekkäin. Kuvissa 3.2 ja 3.3 on kaksi erikokoista kulmaliuskaa.

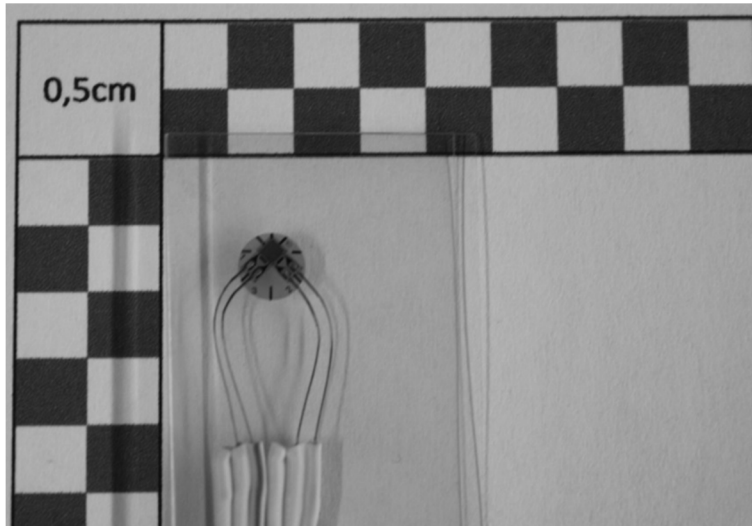
Delta-liuskoilla saadaan selvitettyä kokonaisjännitys sekä maksimi- ja minimijännityksen suunta. Venymäliuskassa on kolme mittaavaa hilaa,  $120^\circ$  kulmassa toisiinsa nähden..



**Kuva 3.1.** Yksihilainen venymäliuska



**Kuva 3.2.** Suurempi mittauksen kulmaliuskoista



**Kuva 3.3.** Pienempi mittauksen kulmaliuskoista.

### 3.2 Venymämittauksen periaate

Tutkimuksessa halutaan saada selville mittauspisteissä esiintyvät jännitysvaihtelut, jännityksien huippuarvot sekä niiden esiintymistiheys. Näistä tiedoista lasketaan riski väsymiseen tai murtumiseen.

”Venymäliuskan toiminta perustuu liuskan hilan venymän aiheuttamaan vastuksen muutokseen hilassa. Vastuksen muutos johtuu osittain johtimen muutoksen fyysisten dimensioiden muutoksesta ja osittain materiaalin ominaisvastuksen  $\zeta$  muutoksesta. Ominaisvastuksen muutos puolestaan aiheutuu materiaalin mikrorakenteen muutoksista. Vastuksen suhteellinen muutos saadaan ratkaistua kaavasta 1.

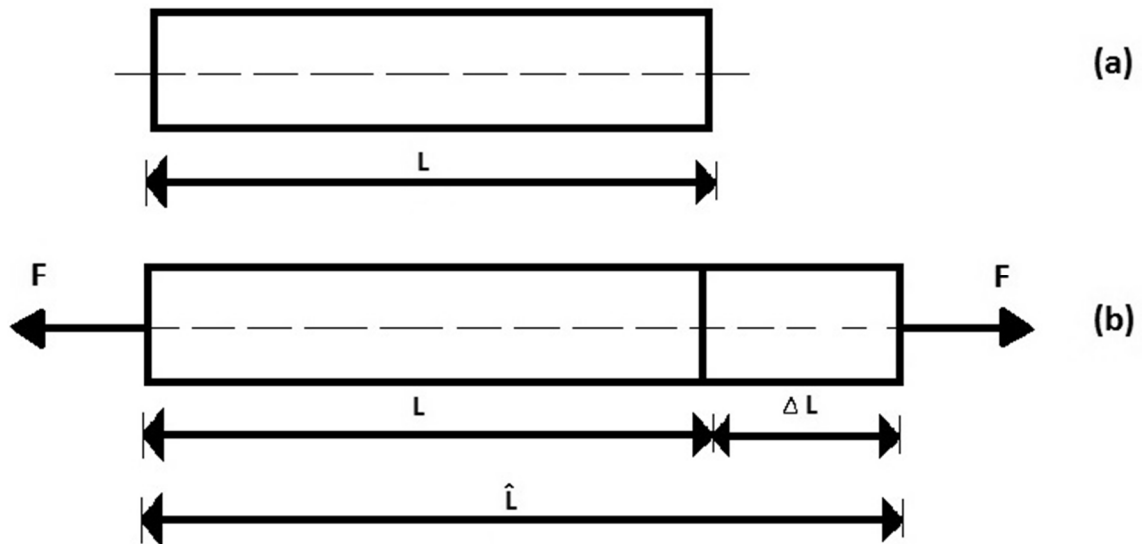
$$\frac{dR}{R} = \varepsilon(1 + 2\nu) + \frac{d\zeta}{\zeta} \quad (1)$$

missä  $R$  on sähköinen vastus,  $\varepsilon$  on suhteellinen venymä,  $\nu$  on Poissonin luku ja  $\zeta$  on ominaisvastus.” [3]

Tarkastelussa on pinnasta mitattava suhteellinen venymä, josta on johdettavissa normaalijännitys. Suhteellinen venymä on pituuden muutoksen suhde alkuperäiseen pituuteen, kaavan 2 mukaisesti. Suhteellinen venymä on havainnollistettu kuvassa 3.4.

$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{L} \quad (2)$$





**Kuva 3.4.** Sauvan aksiaalinen venyminen. a) sauva lepotilassa, b) sauvaan kohdistettu voima F

Tunnettaessa materiaalin kimmomoduuli  $E$  lasketaan koekappaleen normaalijännitys kaavan 3 mukaan. Kaava 3 tunnetaan myös Hooken lakina.

$$\sigma = E\varepsilon \quad (3)$$

missä  $\sigma$  on normaalijännitys ja  $E$  kimmomoduuli. Kohteen kimmomoduuli tunnetaan ja suhteellinen venymä saadaan mitattua, joten normaalijännityksen laskeminen onnistuu.

Mittalaitteistojen avulla mitataan jännitteen muutosta  $e_0$ , josta venymä saadaan selville kaavan 4 mukaisesti

$$\varepsilon = \frac{4e_0}{kE_S} \quad (4)$$

missä  $e_0$  on ulostulojännite joka saadaan mittalaitteistosta luvun 3.3 mukaan,  $k$  jokaiselle liuskalle ominainen liuskavakio ja  $E_S$  Wheatstonen sillan syöttöjännite.

Sijoitetaan mittauksesta kaavan 4 mukainen suhteellinen venymä kaavaan 3

$$\sigma = E\varepsilon = E \frac{4e_0}{kE_S} \quad (5)$$

ja saadaan selville mitattavassa kohteessa esiintyvä normaalijännitys.

### 3.3 Wheatstonen silta

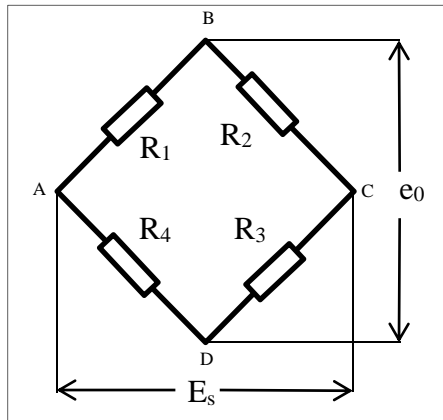
Muutokset venymäliuskan resistanssissa ovat erittäin pieniä, luokkaa  $10^{-3} \Omega$ , jonka vuoksi signaalia on vahvistettava. Vahvistamiseen käytetään Wheatstonen

siltakytkentää, tunnetaan myös nimellä Wheatstonen siltavahvistin. Havainnollistava kuva siltakytkennästä on kuvassa 3.5. Sillan syöttöjännite on usein luokkaa 2..10 V [3].

Wheatstonen sillan peruskytkennässä on neljä vastusta. Yhden tai useamman vastuksen tilalle voidaan vaihtaa venymäliuska, joka toimii vastuksena. Tässä tapauksessa mitattavassa jännitteessä ilmenevästä vaihtelusta voidaan laskea venymäliuskassa tapahtunut vastuksen muutos. Tätä kautta saadaan suhteellinen venymä ja siten normaalijännitys. Riippuen liuskojen lukumäärästä nimitetään siltakytkentöjä taulukon 4.1 mukaisesti.

**Taulukko 4.1.** Wheatstonen siltakytkennät

1 aktiivinen liuska	¼ silta (yksiliuskainen silta)
2 aktiivista liuskaa	½ silta
4 aktiivista liuskaa	kokosilta



**Kuva 3.5.** Havainnekuva Wheatstonen siltakytkennästä

Sillan syöttöjännitteen merkintä kuvassa 3.5. on  $E_s$ . Pisteiden A ja C välinen jännite-ero on sama reittiä ABC sekä ADC

$$E_s = U_{ABC} = U_{ADC} \quad (6)$$

kirjoitetaan jännite resistanssin ja virran avulla

$$\Rightarrow I_{ABC}(R_1 + R_2) = I_{ADC}(R_4 + R_3) \quad (7)$$

jännitteen aleneminen pisteiden AB ja AD välillä

$$\begin{cases} U_{AB} = I_{ABC}R_1 = \frac{R_1}{(R_1+R_2)}E_s \\ U_{AD} = I_{ADC}R_4 = \frac{R_4}{(R_4+R_3)}E_s \end{cases} \quad (8)$$

Mitattavan jännitteen  $e_0$  suuruus on jännitteiden ero haaroissa AB ja AD

$$e_0 = U_{AD} - U_{AB} = E_S \frac{R_2 R_4 - R_1 R_3}{(R_1 + R_2)(R_4 + R_3)} \quad (9)$$

Wheatstonen sillan ollessa tasapainossa, mitattava jännite on  $e_0=0$ . Tämä tarkoittaa, että

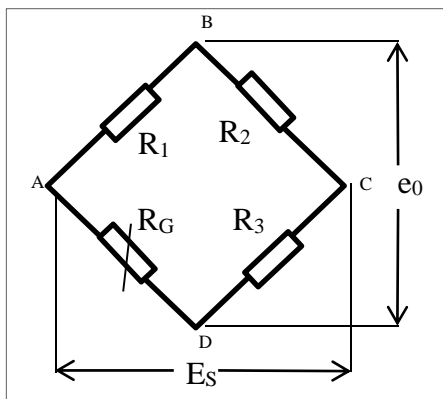
$$R_1 = R_2 = R_3 = R_4 \quad (10)$$

$$\frac{R_1}{R_2} = \frac{R_4}{R_3} \quad (11)$$

yhtälöt 10 ja 11 toteutuvat mittauksen alkutilanteessa.

### 3.4 Yksiliuskainen silta

Yhden mittaavan venymäliuskan Wheatstone siltakytkentää kutsutaan usein 1/4 -sillaksi. Wheatstonen sillan mittaus perustuu sillan epätasapainoon. Resistanssin muutos venymäliuskassa  $R_G$  aiheuttaa jännite-eron pisteiden BD välille. Kuvassa 3.6. on kuvan 3.5 vastuksen  $R_4$  paikalle sijoitettu venymäliuska  $R_G$ .



Kuva 3.6 Yksi aktiivinen liuska

Venymäliuskan resistanssi on alun tasapainotilanteessa sama kuin vastuksilla

$$R_G = R_1 = R_2 = R_3. \quad (12)$$

Mittauksen aikana venymäliuskan resistanssi oletettavasti muuttuu, jolloin seuraa tilanne

$$R_G + \Delta R_G \neq R_1 = R_2 = R_3 = R \quad (13)$$

Yhtälö 13 sijoitetaan yhtälöön 9 seuraa

$$e_0 = E_S \frac{R_2(R_G + \Delta R_G) - R_1 R_3}{(R_1 + R_2)(R_3 + R_G + \Delta R_G)} \quad (14)$$

Anturin ominaisresistanssi on yhtä suuri kuin sillassa olevien vastusten resistanssi

$$R_G = R_1 = R_2 = R_3 = R \quad (15)$$

Sijoitetaan kaavan 15 R yhtälöön 13

$$e_0 = E_S \frac{R(R+\Delta R_G) - RR}{(R+R)(R+R+\Delta R_G)} \quad (16)$$

Sievennetään yhtälö 16

$$e_0 = E_S \frac{R \cdot \Delta R_G}{2R(2R+\Delta R_G)} \quad (17)$$

Mittauksen aikaisen resistanssin muutos  $\Delta R_g$  on pieni, suuruusluokkaa  $10^{-3} \Omega$ , verrattuna vastuksien suuruuteen  $R=120 \Omega$ . Voidaan likimääräistää

$$2R + \Delta R_G = 2R \quad (18)$$

Yhtälö 17 sijoitetaan yhtälöön 16

$$e_0 = \frac{1}{4} * \frac{\Delta R_G}{R} * E_S = \frac{1}{4} * k * \varepsilon * E_S \quad (19)$$

missä k on venymäliuskan liuskavakio,  $\varepsilon$  suhteellinen venymä ja  $E_S$  sillan syöttöjännite.

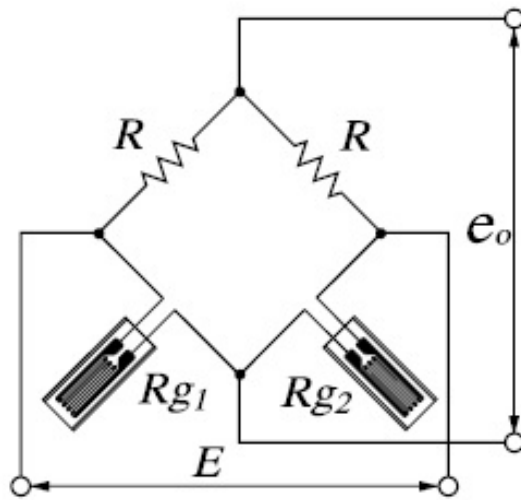
Kuvan 3.6 mukaisessa  $\frac{1}{4}$  -sillassa ei ole otettu huomioon lämpötilakompensaatiota. Normaalisti tämä tapahtuu referenssiliuskalla, jota usein kutsutaan dummyksi. Liuska kiinnitetään paikkaan, jossa jännityksiä ei esiinny, mutta on samaa materiaalia kuin mittauksen kohde sekä samassa lämpötilassa kuin aktiivisen liuskan kohde. Sillassa referenssi kytketään  $R_3$  paikalle. Täten liuskoihin ja johtimiin kohdistuva lämpötilan aiheuttama vääristymä poistuu. Suoritetussa mittauksessa käytetään alumiinille lämpötilakompensoituja venymäliuskoja, joten dummyn käyttö ei ole tarpeen.

### 3.5 Puolisilta

Mitattaessa pääjännityksiä valtaosa mittauksen venymäliuskoista kytkettiin puolisiin. Sillan kytkentä kahdella venymäliuskalla on esitetty kuvassa 3.7. Kulmaliuskoilla mitattaessa kytkennän venymäliuskoina  $R_{g1}$  ja  $R_{g2}$  toimivat kulmaliuskan kaksi hilaa. Puolisillan mitattava jännite ratkeaa kaavan 20 mukaan.

$$e_0 = \frac{(1+\nu)E_S}{4} k\varepsilon \quad (20)$$

missä  $\nu$  on poissonin vakio, alumiinille 0,33,  $E_s$  on sillan syöttöjännite,  $\epsilon$  on suhteellinen venymä ja  $k$  on liuskavakio



**Kuva 3.7.** Kaksi venymäliuskaa puolisillassa [6]

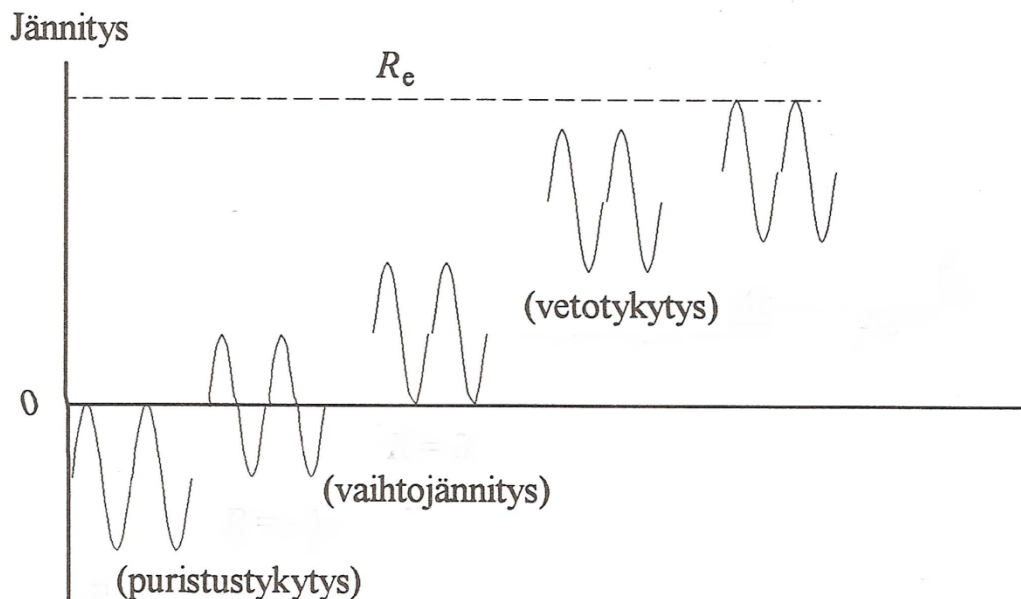
## 4 VÄSYMISTARKASTELU

Oleellisena osana perävaunun analyysissä oli väsymistarkastelu. Kuten myöhemmin käy ilmi hyvin aikaisessa vaiheessa mittauksia havaittiin, ettei rakenteessa ilmene murtorajaa ylittäviä jännityksiä. Tämä korosti väsymistarkastelun merkitystä entisestään.

Väsymistarkastelussa kuormat luokitellaan tyypillisesti käyttäen rainflow-luokitusta. Minerin kumulatiivista vauriosääntöä käyttämällä saadaan selville kumulatiivinen vaurio ja voidaan arvioida rakenteen kestoiät mittauspisteissä.

### 4.1 Väsyttävät kuormat

Rakenteisiin kohdistuva vaihteleva jännitys on sekä puristus- tai vetotokytystä että vaihtojännitystä, riippuen vaunun lastauksesta. Eri jännitysvaihtelutyypit on esitetty kuvassa 4.1.



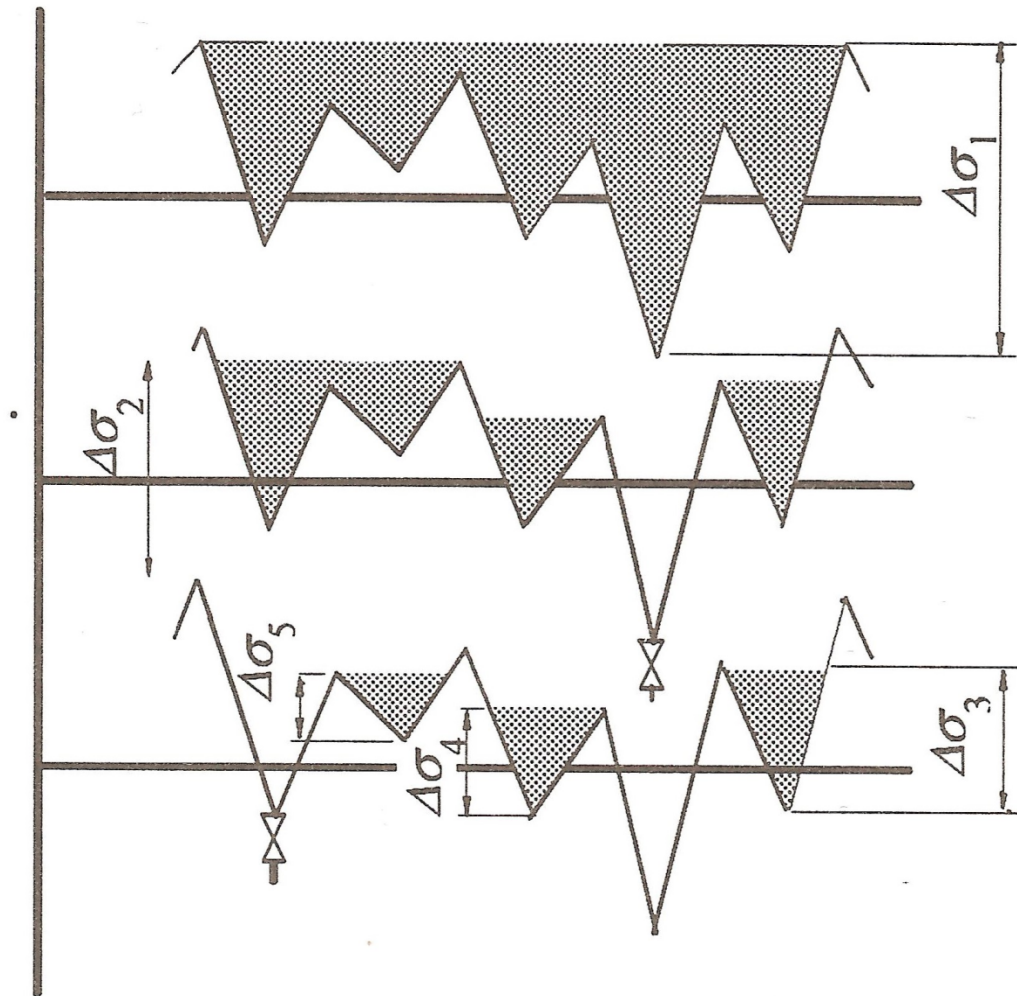
Kuva 4.1. Esimerkkikuva sinimuotoisista jännitysvaihtelutyypeistä [1]

### 4.2 Rainflow -menetelmä

Mittausdatalle suoritetaan tyypillisesti Rainflow –luokitus väsymistarkastelujen yhteydessä. Luokitus voidaan suorittaa useimmilla analyysiohjelmistoilla.

Mittausdatan jännitysvaihtelut on jaettava luokkiin, jotta niitä pystytään käsittelemään. Usein Rainflow -luokitusta havainnollistetaan vesisäiliöanalogialla, kuva 4.2.

Ajatellaan avattavaksi aina pohjassa oleva venttiili, jolla saadaan suurin pinnan lasku. Pinnan laskun suuruus on kyseinen  $\Delta\sigma$ . Näin vältetään, että heilahduksia käsiteltäisi useammin kuin kerran.



**Kuva 4.2.** Havainnekuva vesisäiliöanalogian ideasta. [1]

Mitatut jännityssykliä jaetaan haluttuun lukumäärään luokkia. Kukin luokka sisältää määrätyn suuruiset jännitysvaihtelut. Mittausdatan analyysissä on jännitysvaihtelut jaettu 10 luokkaan.

### 4.3 Minerin hypoteesi

Materiaalien väsytykset tehdään usein vakioamplitudisella sinimuotoisella kuormituksella, joiden tuloksista muodostetaan materiaalien Woehler – käyrästä. Jotta näitä päästäisiin soveltamaan muuttuvan amplitudisen jännityksen tapaukseen on

sovellettava esimerkiksi Minerin hypoteesia. Minerin hypoteesi (tunnettu myös nimillä Palmgren-Minerin teoria, Miner's rule) on yksinkertainen, mutta toimivaksi havaittu tapa tarkasteltaessa väsymistä vaihtelevan suuruisilla jännityksillä. Se voidaan kirjoittaa kaavan 21 muotoon [2]

$$D = \sum_{i=1}^k \frac{n_i}{N_{fi}} = \frac{n_1}{N_1} + \frac{n_2}{N_2} + \dots + \frac{n_k}{N_k} \quad (21)$$

missä  $D$  on vauriosumma eli kestoiästä kulutettu osuus,  $n_i$  on jännitysjaksojen lukumäärä,  $N_{fi}$  on kestoikä vakioamplitudisella kuormituksella jonka vaihteluväli on  $\Delta\sigma_i$ ,  $i$  on alin huomioon otettava jännitysvaihteluluokka ja  $k$  on suurimman jännitysheilahduksen luokka [1]

Minerin hypoteesissa ei huomioida niitä jännitysluokkia joiden kestoikä on ääretön. Vauriosumman  $D$  saavuttaessa arvon yksi, on vaurio odotettavissa. Todellisuudessa vauriosumma vaihtelee 0,7..2,2 välillä. Mitä pienempi vauriosumman  $D$  arvo on, sitä suurempi on varmuus vaurion kannalta.



## 5 ONGELMAN ESITTELY

Kohdassa kaksi esitellyssä telinrakenteessa ilmenee toistuva hitsisauman murtuminen. Ulomman konsolin ja pystylevyn välinen pienahitsi murtuu käytössä. Rakennetta pyrittiin vahvistamaan jäykistämällä pystylevyjä. Seurauksena on kuitenkin rakenteen kestoiän aleneminen. Murtunut sauma on esitelty kuvassa 5.1. Murtumakohta on korostettu maalaamalla. Murtuvan sauman ympäristöä tarkasteltaessa kävi ilmi, että pystylevyllä ei ole kontaktia säiliön pohjaan. Pystylevy hitsataan tarkoituksella irti säiliön pohjasta ajatuksena, ettei pystylevyn kontakti rikkoisi säiliön pohjaa.

Tällainen rakenne johtaa tilanteeseen, jossa kaikki telialustasta säiliöön kulkevat voimat siirtyvät hitsisaumojen kautta. Hitsisaumat altistuvat dynaamiselle kuormitukselle. Tässä on varmasti yksi avaintekijä murtumiselle. Hitsisaumojä oli aiemmin jo suu

rennettu ja sauman kasvattaminen edelleen hankaloittaa hitsausta sauman muodostuessa tarpeettoman suureksi. Lisäksi voitiin melkoisella varmuudella arvioida rakenteen olevan virheellisesti suunniteltu.



**Kuva 5.1.** Kuva murtuneesta hitsisaumasta [Eurotank Oy]

### 5.1 Väsyminen

Säiliöpuoliperävaunun kuormat ovat erittäin suuria. Valmistajan ilmoittama suurin sallittu kokonaismassa 43 000 kilogrammaa, josta telin osuus on 25 000 kilogrammaa.

Ajossa säiliöpuoliperävaunuihin kohdistuu erittäin vaihtelevia kuormituksia. Teiden kunto on vaihtelevaa ja ajossa vaunuun kohdistuu erilaisia kiihtyvyyksiä. Vaunun alustan tulisi kestää kolarissa 2 g:n kiihtyvyys. Tyypilliseksi kiihtyvyydeksi tiukassa jarrutuksessa arvioitiin noin  $5 - 6 \frac{m}{s^2}$ . Myös hidasteet ja liikenneympyrät aiheuttavat suuria kuormituksia alustaan. Näiden aiheuttamia maksimijännityksiä sekä jännitysvaihteluita tarkasteltiin venymäliuskamittauksilla. Voimakkaat kuormitusvaihtelut yhdistettynä alumiinirakenteeseen vaatii väsymistarkastelua.

## 6 VENYMÄLIUSKAMITTAUS

Olemassa olevaa rakennetta tarkasteltaessa valittiin päätyökaluksi venymäliuskamittaus. Venymäliuskamittauksella saatiin selvitettyä kohteen pääjännitykset sekä rakenteessa esiintyviä jännityshuippuja. Samalla pyrittiin selvittämään hitsisaumassa esiintyviä jännityksiä. Johtuen kyseisten vaunujen vähäisestä käytöstä Suomessa, mittaus suoritettiin Norjassa.

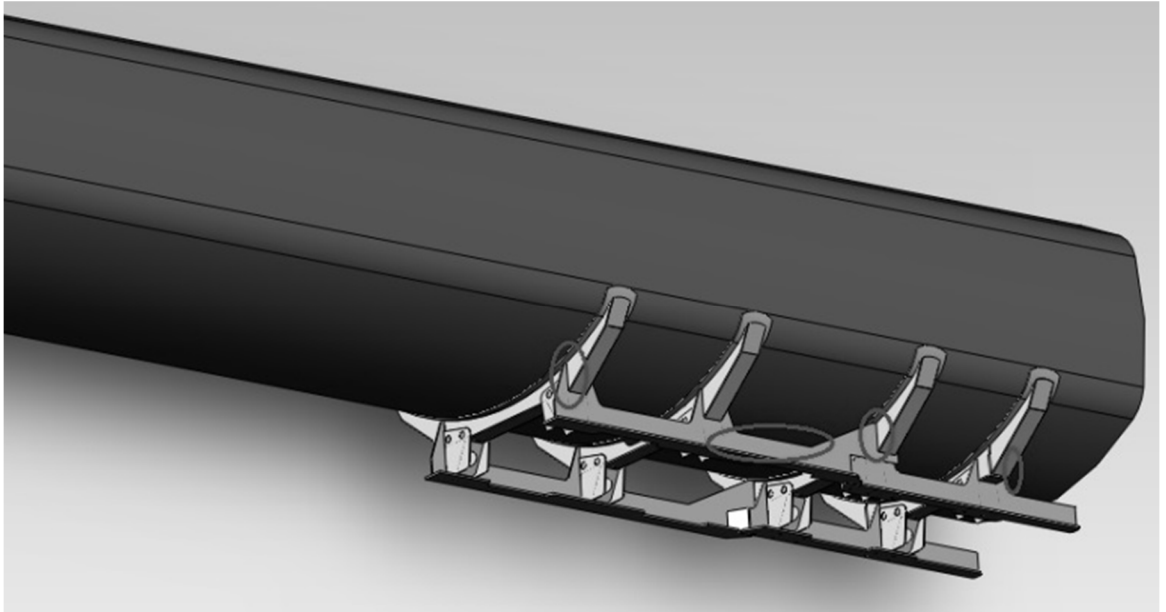
### 6.1 Venymäliuskamittauksen suunnittelu

Venymäliuskat antavat tarkan tuloksen kohtuullisilla kustannuksilla. Mittausta suunniteltaessa päätettiin mittausten pääpaino keskittää konsolien ja pystylevyn hitsisaumoihin sekä saumojen lähiympäristöön. Hitsausaumojen lähiympäristössä vallitsevat jännitystilat ovat analyysin suurimman kiinnostuksen kohteena. Venymämittausta toteuttaessa tulee mittauspisteitä olla riittävän kattava joukko, jotta vaunussa olevista voimista saadaan riittävän kattava kuva. Toisaalta liian suuri määrä venymäliuskoja tuottaa valtavan määrän dataa, jonka analysoinnissa on valtavasti työtä. Koejärjestelyn mittauksessa käytetään kolmea venymäliuska mallia. Kaksi näistä on tyypiltään kulmaliuskoja ja yksi on yksihilainen. Venymäliuskat ovat alumiinille lämpötilakompensoituja, joten erillistä lämpötilakompensaatiota kytkennöissä ei vaadita.

Tutkittaviksi alueiksi valittiin etummaisen konsolin alue, jolle kolmannen konsolin alue mitattaisiin verrokiksi. Myös pystylevyä ja takimmaista konsolia tarkasteltaisiin väsymisen vuoksi. Tarkemmat mittauspisteet esitetään kappaleessa 6.2.

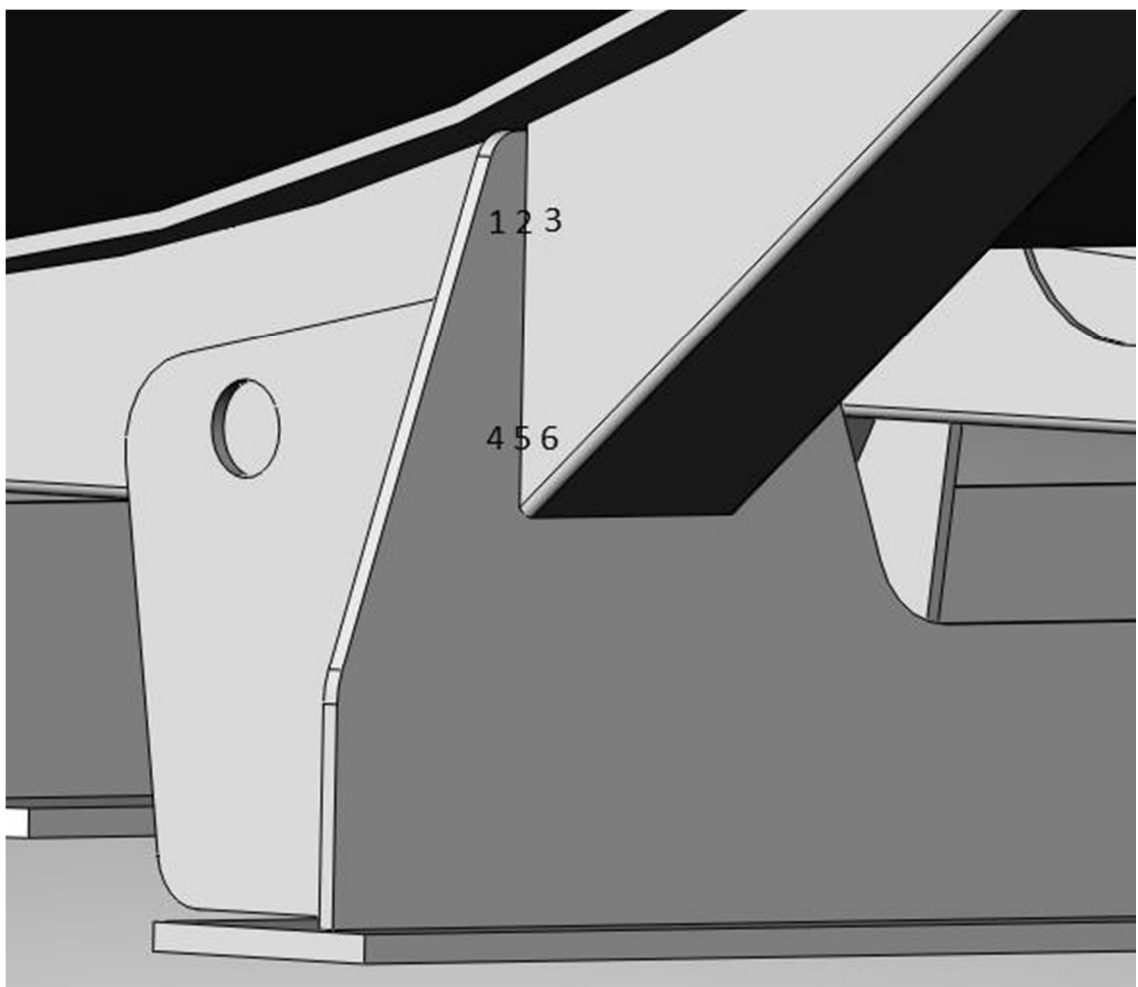
### 6.2 Mittauspisteet

Tarkasteltavia alueita oli neljä kappaletta: Etummaisen konsolin sauma ja sen ympäristö, jolle oli referenssinä kolmas konsoli. Takimmaisessa konsolissa mitattiin hitsausauman yläreuna ja pystylevyä mitattiin kolmesta kohdasta. Mittausalueet on esitetty kuvassa 6.1. Venymäliuskat ovat kaksiakselisia pois lukien mittauspisteet 7, 8 ja 9, jotka ovat yksihilaisia. Mittaussuunnat ovat pystysuunnassa ja vaakatasossa.



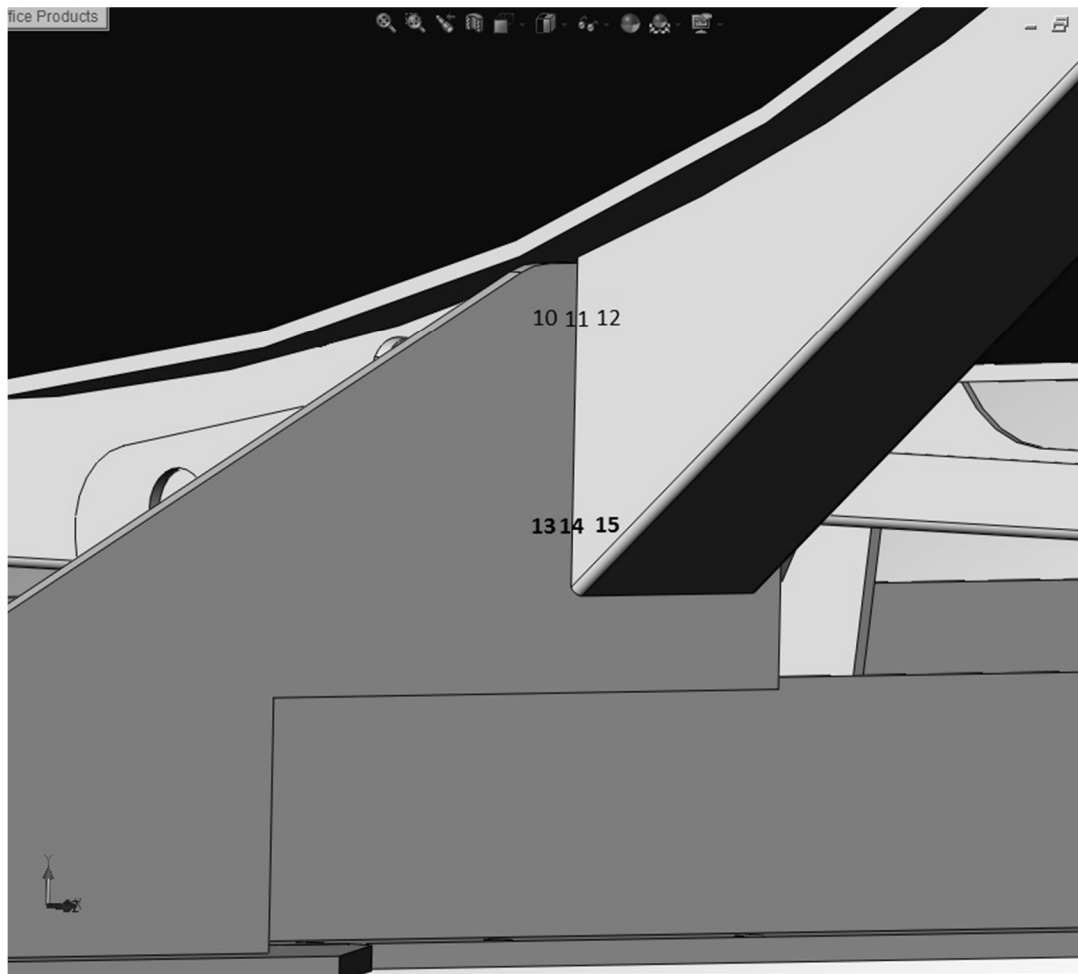
**Kuva 6.1.** Mittausalueet

Etummaisien konsolin alueella ovat venymäliuskat 1-6. Anturien sijainnit ovat osoitettu kuvassa 6.2. Liuskat 2 ja 5 ovat kiinni tutkittavassa saumassa.



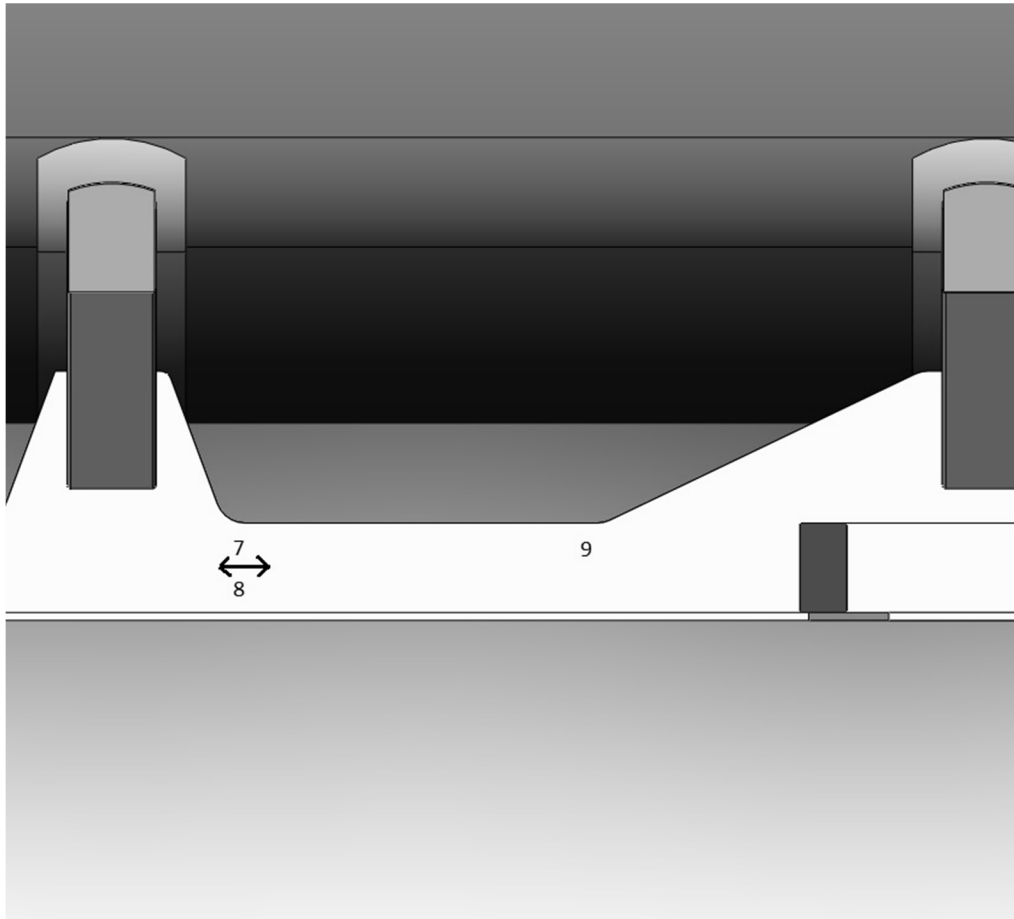
**Kuva 6.2.** Etummaisien konsolin anturien sijainnit

Edestä luettuna kolmas konsoli mitattiin referenssiksi etummaiselle konsolille, joka oli pääasiallinen tutkittava kohde. Näin saatiin arvoja, joita voitiin keskenään verrata. Kolmas konsoli on esitetty kuvassa 6.3



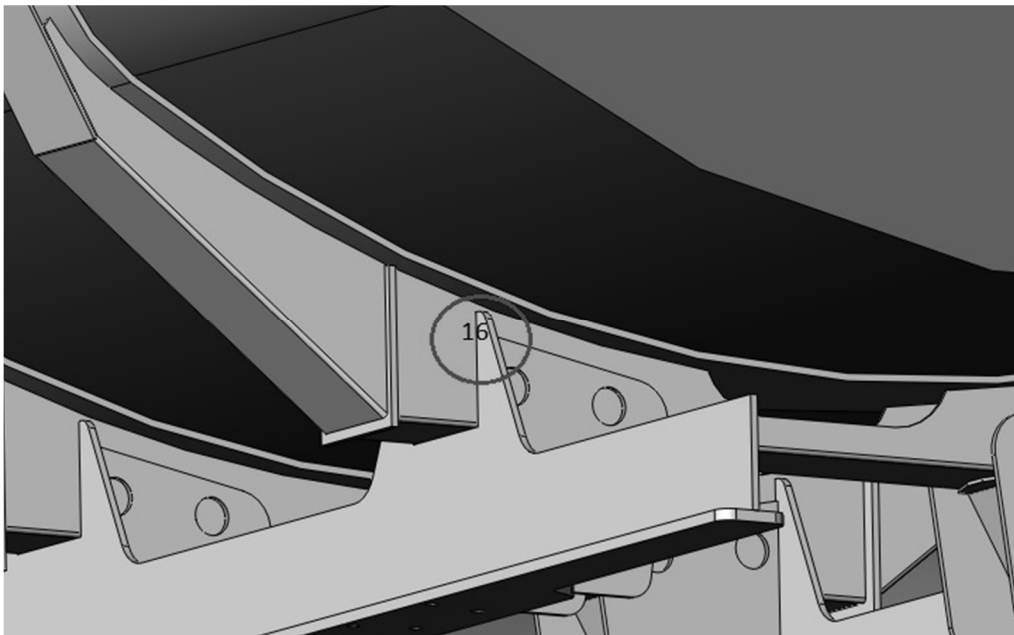
**Kuva 6.3.** Kolmas konsoli, joka mitattiin referenssiksi

Kuvassa 6.4 on esitetty pystylevyssä olevat liuskat, jotka ovat yksiakselisia ja mittaavat vaunun pituusakselin suuntaisesti. Antureiden numerot ovat 7, 8, 9.



**Kuva 6.4.** Pystylevyn yksiakseliset liuskat ja mitaussuunta

Takimmaisen konsolin hitsausseaman yläreuna mitattiin kuvan 6.5 mukaisesta kohdasta. Tällä mittauksella haluttiin varmistua, ettei takimmaisessa konsolissa ole suuria jännityksiä.



**Kuva 6.5.** Takimmaisen konsolin venymäliuskan mittauspiste

### 6.3 Mittauksen toteutus

Mittaus toteutettiin Oslon lähialueilla sekä Lillehammerin ympäristössä. Mitattava säiliöpuoliperävaunu kuului kuljetusliike Martinsenille.

Mittaus suoritettiin kahdessa osassa, eri päivinä. Ensimmäisenä päivänä mitattiin pääjännitykset kaikilla 16 liuskalla. Toisena päivänä tutkittiin hitsisaumassa esiintyvää sauman suuntaista jännitystä. Kumpikin näistä mittauksista käsittää yhden työvuoron ajon, vuorokaudessa ajetaan tyypillisesti kaksi työvuoroa.

Vahvistin sijaitsi perävaunun varustelaatikossa, josta kulki ethernet kaapeli vetoautoon. Vetoautossa sijaitsi mittauksen suorittaja kannettavan tietokoneen kanssa tallentamassa tapahtumia. Molemmissa mittauksissa mittaustaajuus oli 600 Hz.

Kuvassa olevan kanavan nimen ollessa normaalijännitys\_x, tarkoittaa että venymä on muunnettu levyn normaalijännitykseksi. x tarkoittaessa kyseisen mittauspisteen numeroa. Filter\_x tarkoittaa, että normaalijännityksestä on suodatettu pois yli 100 hertsin taajuudet.

### 6.4 Ensimmäisen mittauksen tulokset

Ensimmäistä mittauspäivää voidaan pitää tärkeämpänä väsymislaskennan kannalta. Mittaus jakautui neljään osaan vaunun lastaamisen ja tyhjentämisen mukaisesti. Eri mittausten kuvaajien aika-akselit eivät ole jatkuvat. Uuden mittauksen alkaessa  $t=0$  s.

Mittautuloksien arvoissa on huomioitu taulukon 7.1 mukaiset rakenteen oman massan aiheuttamat jännitykset. Mitattuihin tuloksiin on siis huomioitu FEM – mallista saadut arviot rakenteen lepotilassa esiintyvälle normaalijännitykselle.

#### 6.4.1 Mittaus 1.1 – vaunu tyhjä

Ensimmäinen osuus oli siirtyminen tyhjänä hallilta Lenasta Osloon kuormaamaan vaunu. Matka on noin 110 kilometriä. Kuten odotettua siirtymän aikana ei ilmennyt suuria jännitysvaihteluja. Kuormitus on epäsymmetristä vaihtokuormitusta, sillä mittauksessa ilmenee vetoa ja puristusta. Taulukossa 6.1 on esitetty mittauksen kunkin kanavan maksimi- ja minimijännitykset.

**Taulukko 6.1.** Mittauksen 1.1 minimi- ja maksimijännitykset.

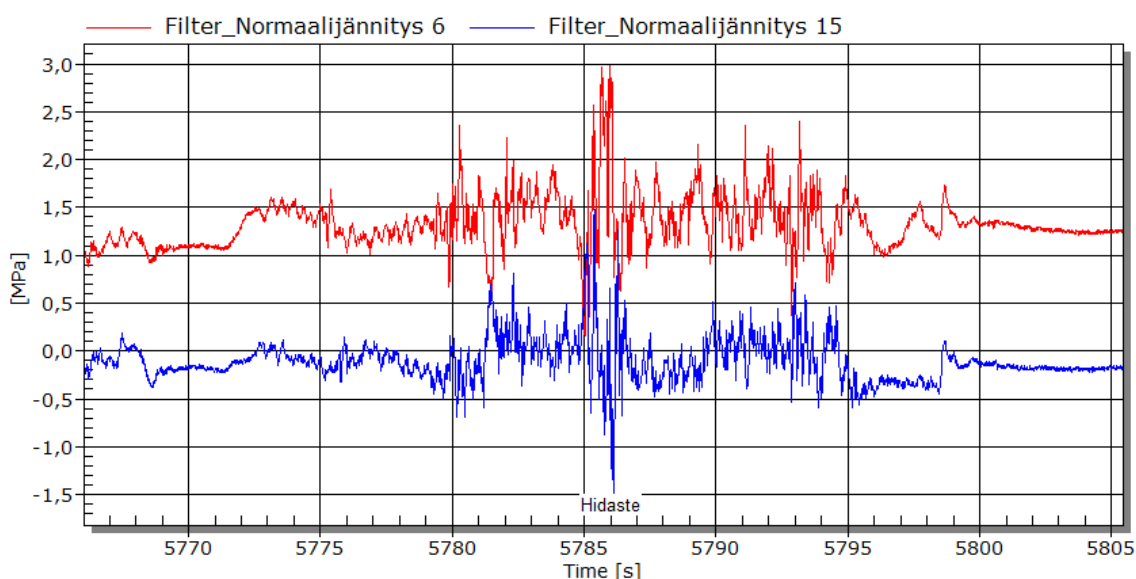
[MPa]	1	2	3	4	5	6	7	8
$\sigma_{\min}$	-2,293	-2,899	-2,109	-1,182	-1,181	-1,231	-0,408	-2,117
$\sigma_{\max}$	2,985	3,161	3,965	1,425	3,796	3,673	1,060	6,670
	9	10	11	12	13	14	15	16
$\sigma_{\min}$	-4,321	-0,5804	-2,370	-2,020	-3,944	-0,1242	-1,611	-0,198
$\sigma_{\max}$	13,660	1,081	3,700	1,883	4,265	1,062	2,307	1,435

Suurin vaihtojännitys löytyy mittauspisteestä yhdeksän, joka on yksiakselinen liuska pystylevyssä. Venymäliuska numero 9 kuitenkin irtoaa ennen seuraavaa

mittausta, joten arvoon on suhtauduttava varauksella. Voi olla että liuskan kiinnitys oli epäonnistunut. Konsoleissa olevien liuskojen suurin vaihteluväli on liuskassa 13, arvon ollessa 8,209 MPa.

Rakenteissa käytettyjen alumiinien myötöraja  $R_E$  on noin 80 MPa ja murtoraja  $R_M$  180 MPa. Suoraa murtumaa aiheuttavia jännityksiä ei esiinny, mutta väsyminen on tarkasteltava.

Kuvassa 6.6 on esimerkki normaalijännityksen muutoksista hidasteeseen ajettaessa. Kuvassa on venymäliuskan numero 6 sekä sen referenssivenymäliuskan kuvaajat. Normaalijännityksen muutokset ovat erittäin pieniä. Maksimivetojännitys on noin 3 megapascalia, joka on suuruudeltaan pieni.



Kuva 6.6. Hidasteen aiheuttamat muutokset normaalijännityksessä

#### 6.4.2 Mittaus 1.2 – vaunu lähes täysi

Mittaus 1.2 suoritettiin suurimmalla mittauksen aikaisella kuormalla. Mittauskuorma ei ole vaunun maksimikuorma, mutta erittäin lähellä sitä. Tietokoneen nollaamisen jälkeen vaunu lastattiin Oslossa. Bensiiniä ja dieseliä kuormattiin kaikkiaan noin 43,5 m<sup>3</sup>, suurimman tilavuuden ollessa 47 m<sup>3</sup>. Venymäliuska 9 irtosi mittauksen aikana. Mittauksen huippuarvot on esitetty taulukko 6.2:ssa.

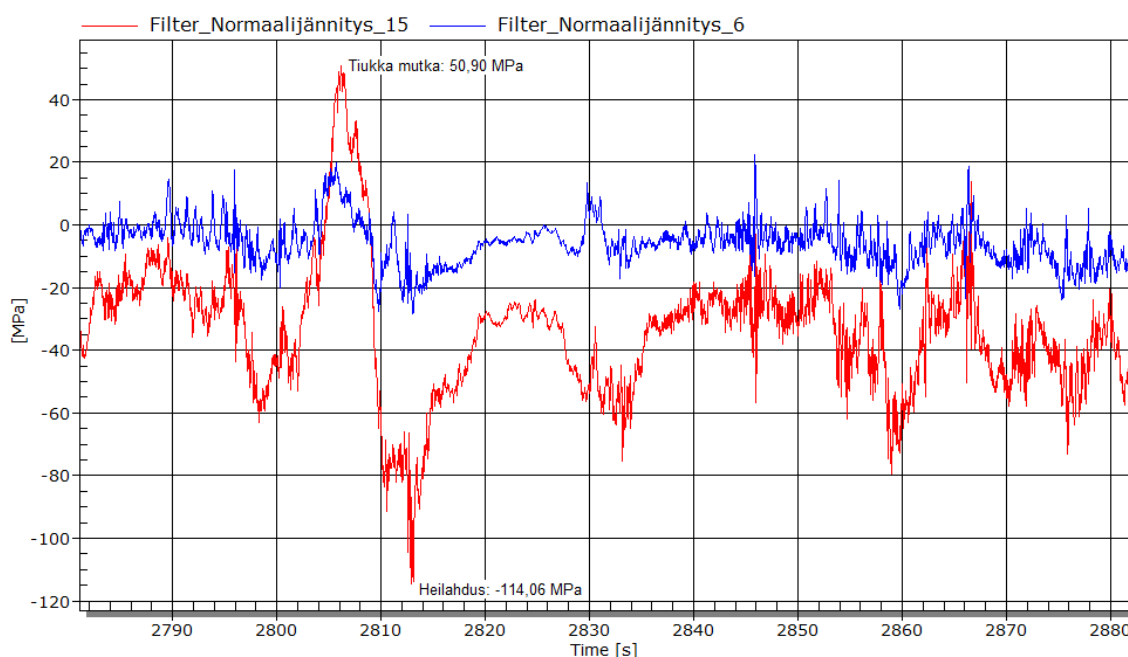
Taulukko 6.2. Mittauksen 1.2 minimi- ja maksimijännitykset.

[MPa]	1	2	3	4	5	6	7	8
$\sigma_{\min}$	-65,990	-92,44	-97,55	-23,48	-69,43	-37,47	-28,28	-204,96
$\sigma_{\max}$	37,460	69,18	29,08	18,53	46,56	40,08	1,426	10,08
	9	10	11	12	13	14	15	16
$\sigma_{\min}$	#	-4,468	-26,780	-96,26	-50,62	-2,007	-121,040	-1,333
$\sigma_{\max}$	#	79,22	46,28	46,35	59,27	15,74	63,7	36,28



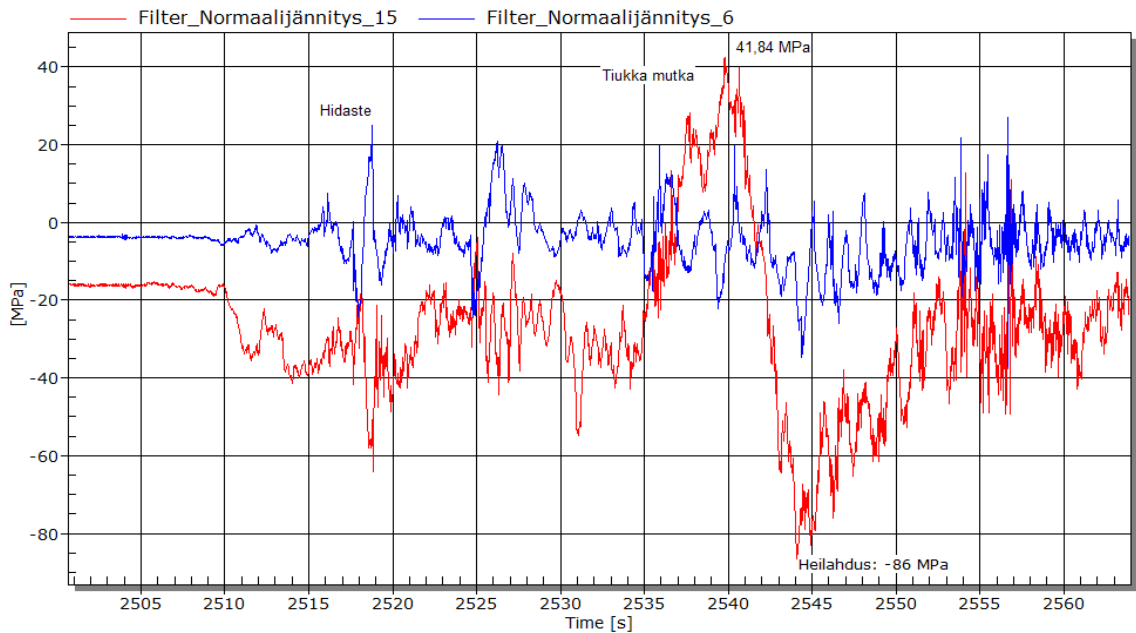
Suurin maksimijännitys esiintyy taaemman pystylevyn yläreunassa. Mittauspisteessä 2, eli etummaisen sauman yläreunassa on sekä suuri maksimijännitys että suuri jännityksen vaihteluväli.

Kuvasta 6.7 nähdään, kuinka tiukat kaarteet aiheuttavat suuria jännityksiä. Tiukassa mutkassa esiintyvän jännityshuipun arvo kyseisessä mittauksessa on 50,90 MPa, kyseessä on vetoa. Tämä on huomattavan suuri jännitys, vaikkei ylitäkään myötörajaa. Usein väsymisanalyyseissä vetojännitykselle käytetään alennettua myötörajaa, sillä veto on rakenteen kestävyyskannalta vaarallisempaa kuin puristus. Mutkan jälkeinen nesteen liikkeestä aiheutuva heilahdus aiheuttaa vielä suuremman jännityksen. Jännityksen suuruus ylittää myötörajan, kyseessä puristus. Huomioitavaa on myös jännitysten suuruus, kuvan 6.7 sininen käyrä kuvaa edessä ulommassa konsolissa olevaa jännitystä. Punainen on tämän referenssi, venymäliuska 15. Vastoin ennako-odotuksia liuska 15:ssä jännitykset vaikuttavatkin suuremmilta.



**Kuva 6.7.** Tiukan mutkan aiheuttamat jännitykset liuskoissa 6 ja 15

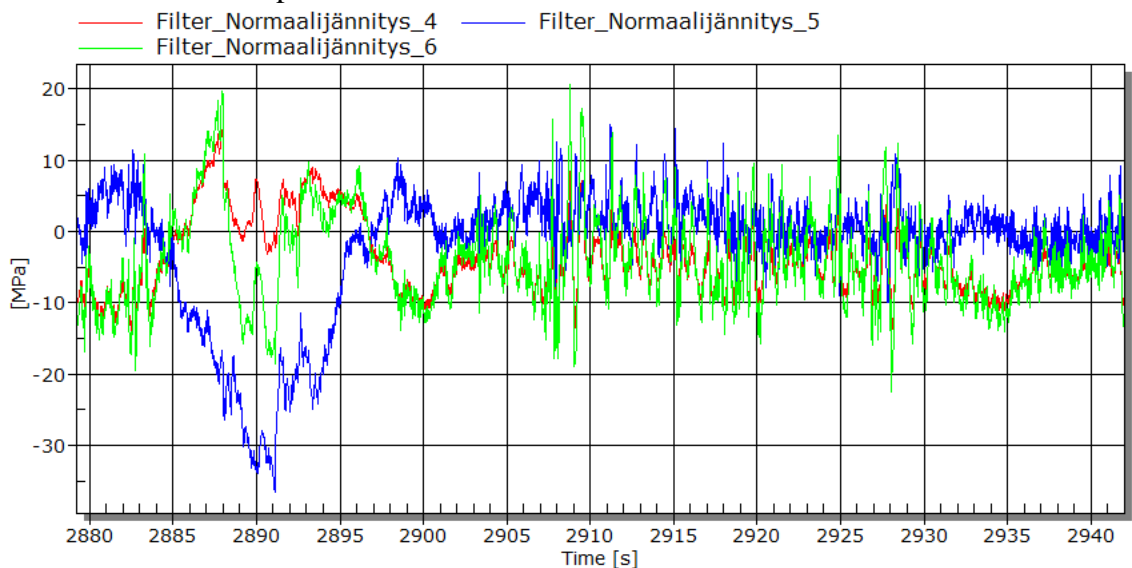
Mittausta suunniteltaessa asiakkaan toimesta epäiltiin, että rakenteen kannalta vahingollisimpia muotoja tiessä olisivat hidasteet. Tämän jälkeen vaarallisimmaksi arveltiin tiukat mutkat. Kuva 6.8 osoittaa kuitenkin päinvastaista.



**Kuva 6.8.** Hidasteen ja tiukan mutkan aiheuttamat jännitykset liuskoissa 6 ja 15

Kuvassa 6.8 perävaunu ajoi ensin hidasteeseen  $t_{\text{hidaste}}=2517$  s, jonka jälkeen erittäin tiukkaan mutkaan  $t_{\text{tiukka\_mutka}}=2526$  s. Sinisellä kuvattu etummaisen konsolin pisteen 6 jännitykset ovat suunnilleen samaa luokkaa. Takana mutkan aiheuttamat huippujännitykset ovat mutkassa merkittävästi suuremmat. Puristusjännityksen huippu 86 MPa ylittää myötörajan 80 MPa. Liitteessä 1 on esitetty kuvan 6.8 tilanteen normaalijännitykset jokaisen kanavan osalta eriteltynä.

Liikenneympyrään ajettaessa nesteen liike on havaittavissa jännityksien vaihteluna. Kuvassa 6.9 on esimerkki liikenneympyrään ajamisesta. Liikenneympyrään saavutaan hetkellä  $t_{\text{ympyrä}}=2880$  s. Nesteen liike on havaittavissa vielä lähes minuutin kuluttua hetkellä  $t=2935$  s. Kuvassa 6.9 on verrattavissa jännityksien käyttäytyminen sauman molemmilla puolilla sekä itse saumassa.



**Kuva 6.9.** Liikenneympyrään ajaminen hetkellä  $t=2880$  s

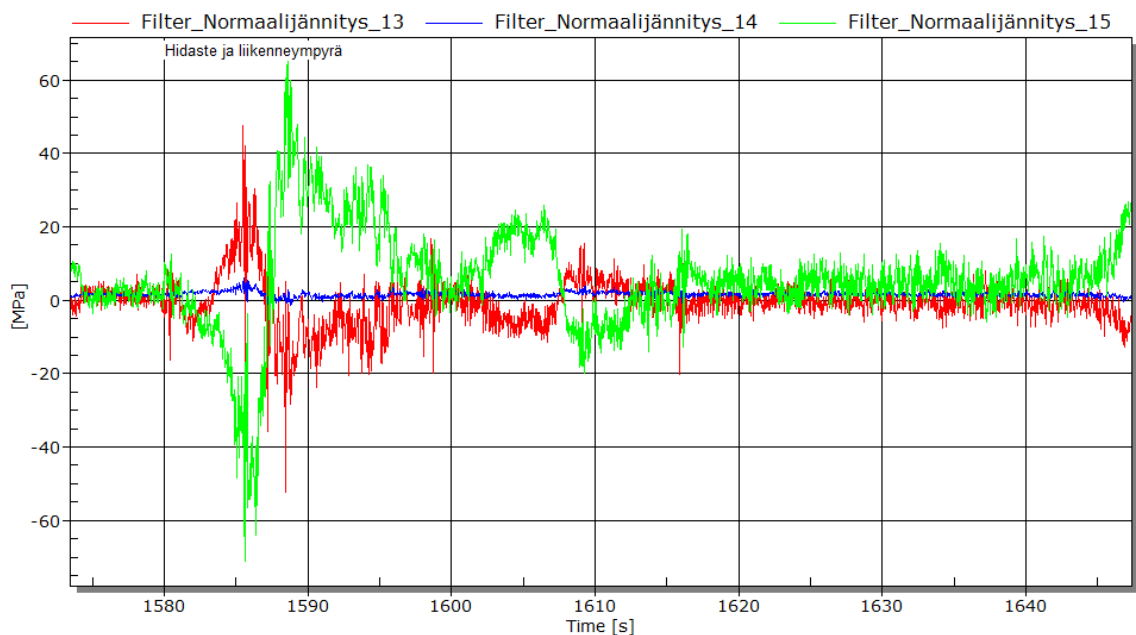
### 6.4.3 Mittaus 1.3 – vaunu puolillaan

Mittaus 1.2 ja 1.3:n välissä osa vaunun kuormasta on purettiin. Mittaus 1.3 ajettiin pienemmällä kuormalla kuin mittaus 1.2. Mittaus 1.3:n maksimi ja minimijännitykset on esitetty taulukossa 6.3.

**Taulukko 6.3.** Mittauksen 1.3 minimi- ja maksimijännitykset.

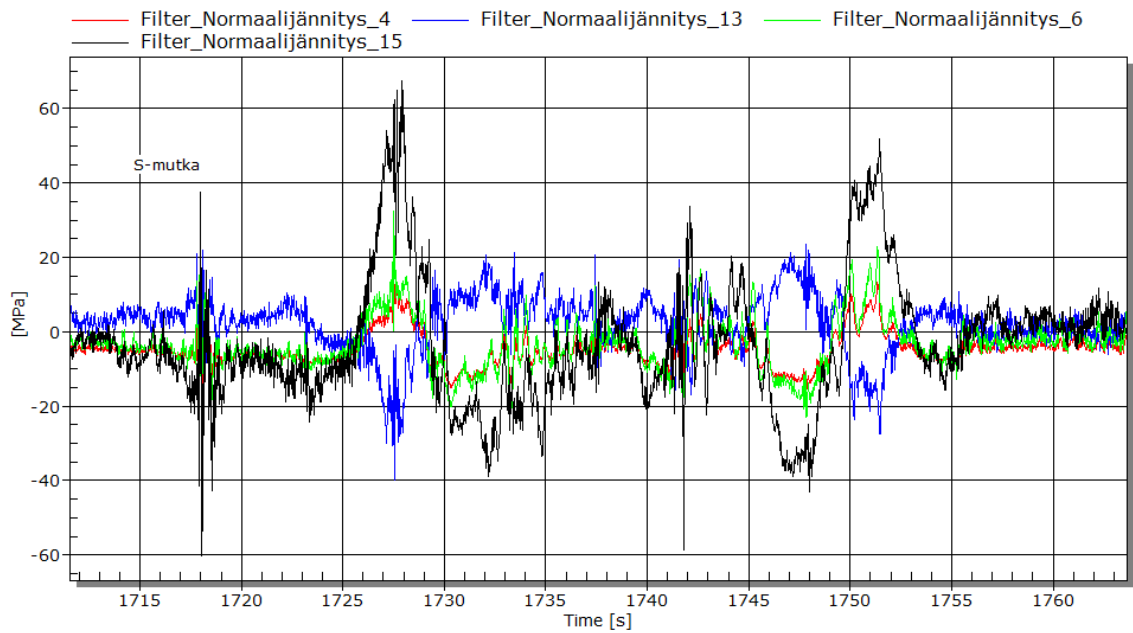
[MPa]	1	2	3	4	5	6	7	8
$\sigma_{\min}$	-51,46	-51,38	-68,69	-24,79	-39,68	-38,25	-9,61	-67,72
$\sigma_{\max}$	44,68	74,03	73,35	20,55	55,3	35,89	17,65	137,67
	9	10	11	12	13	14	15	16
$\sigma_{\min}$	#	-30,86	-38,98	-79,08	-52,43	-3,422	-107,65	-53,98
$\sigma_{\max}$	#	40,36	46,73	68,1	58,59	12,21	86,21	8,674

Kuvassa 6.10 näkee  $t=1585$  s ajetun korotetun liikenneympyrän vaikutukset. Kuvassa on vertailussa taaemman konsolin alareunan venymäliuskat. Hidasteen aiheuttama puristus näkyy ensimmäisenä, jonka jälkeen käännökseen aiheuttama veto ja nesteen liikkeen hidastuminen seuraavan minuutin aikana.



**Kuva 6.10.** Nousu korotettuun liikenneympyrään

Kuva 6.11 on hieman epäselvä, johtuen usean venymäliuskan tuloksesta. Kuvassa on esitetty pystylevyn ja konsolin alareunojen mittauspisteisiin kiinnitettyjen venymäliuskojen tulokset. Mutkaan ajettiin hetkellä  $t_{\text{mutka}}=1717$  s, lisäksi hetkellä  $t_{\text{hidaste}}=1742$  s vaunulla ajettiin hidasteeseen..



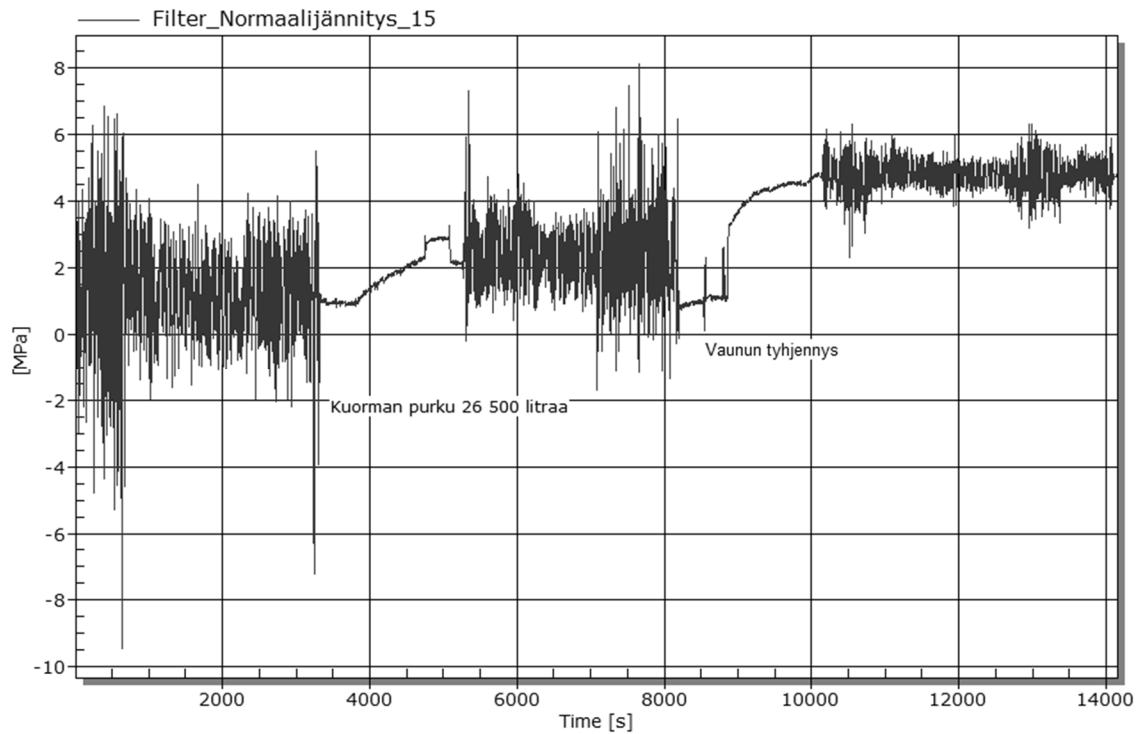
Kuva 6.11. Kaksoismutkan ja nesteen heilahtelun vaikutus

#### 6.4.4 Mittaus 1.4 – vaunun tyhjennys

Mittauksen aikana vaunu tyhjennettiin. Jännitystason muutos on nähtävissä hyvin kuvasta 6.12. Kuorman kevenemisen myötä ulomman konsolin jännitys vaihtuu yhä selvemmin vedoksi. Ensimmäisen mittauspäivän viimeisessä mittauksessa venymäliuska 14 irtosi. Taulukossa 6.4 mittauksen maksimi- ja minimijännitykset.

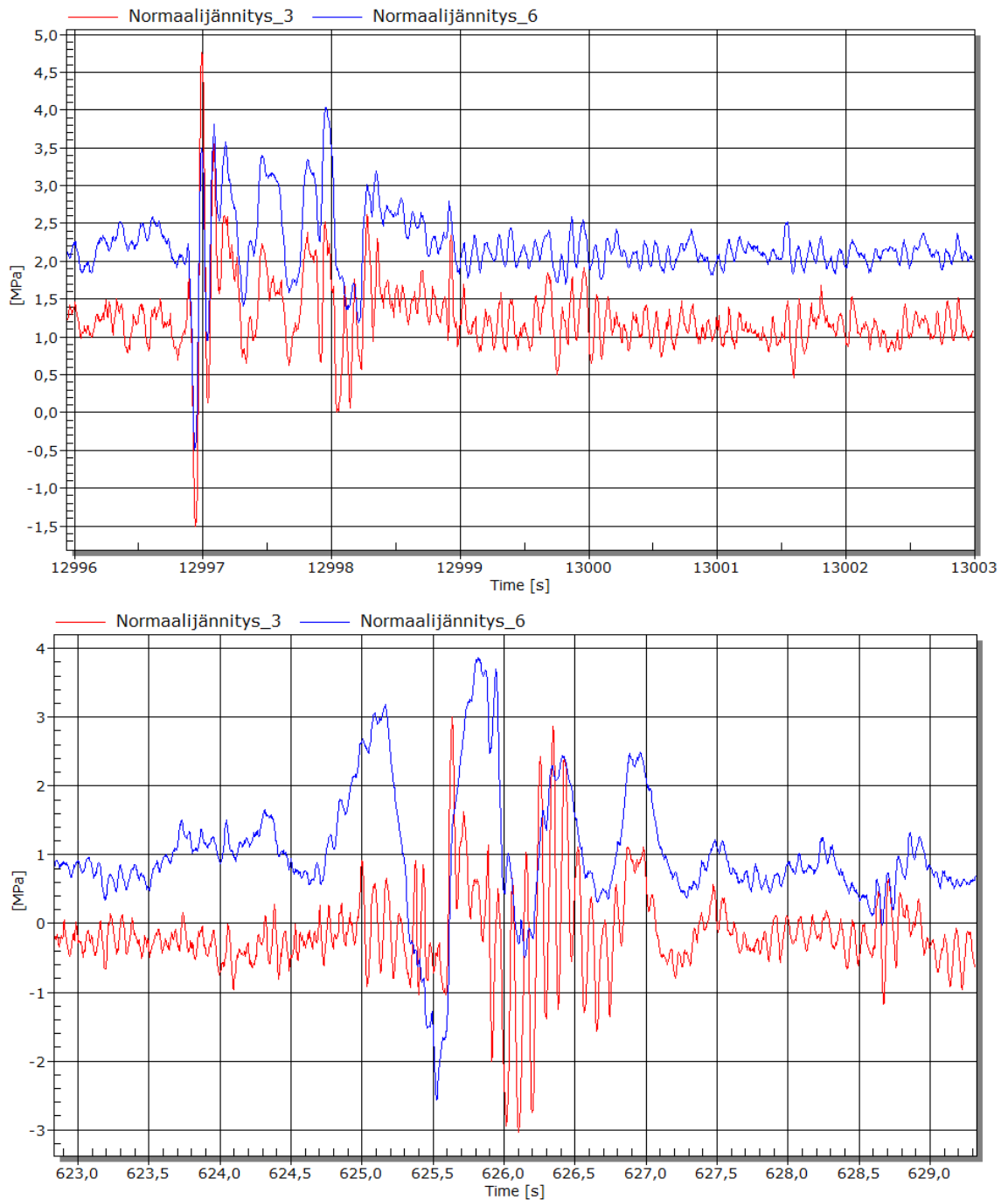
Taulukko 6.4. Mittauksen 1.4 minimi- ja maksimijännitykset.

[MPa]	1	2	3	4	5	6	7	8
$\sigma_{\min}$	-4,288	-5,414	-5,479	-3,122	-2,71	-4,525	-1,035	-10,88
$\sigma_{\max}$	5,010	5,481	7,177	1,73	5,538	5,076	1,827	10,55
	9	10	11	12	13	14	15	16
$\sigma_{\min}$	#	-5,582	-3,755	-6,782	-5,425	#	-9,453	-1,967
$\sigma_{\max}$	#	4,969	5,003	7,212	6,331	#	8,12	1,776



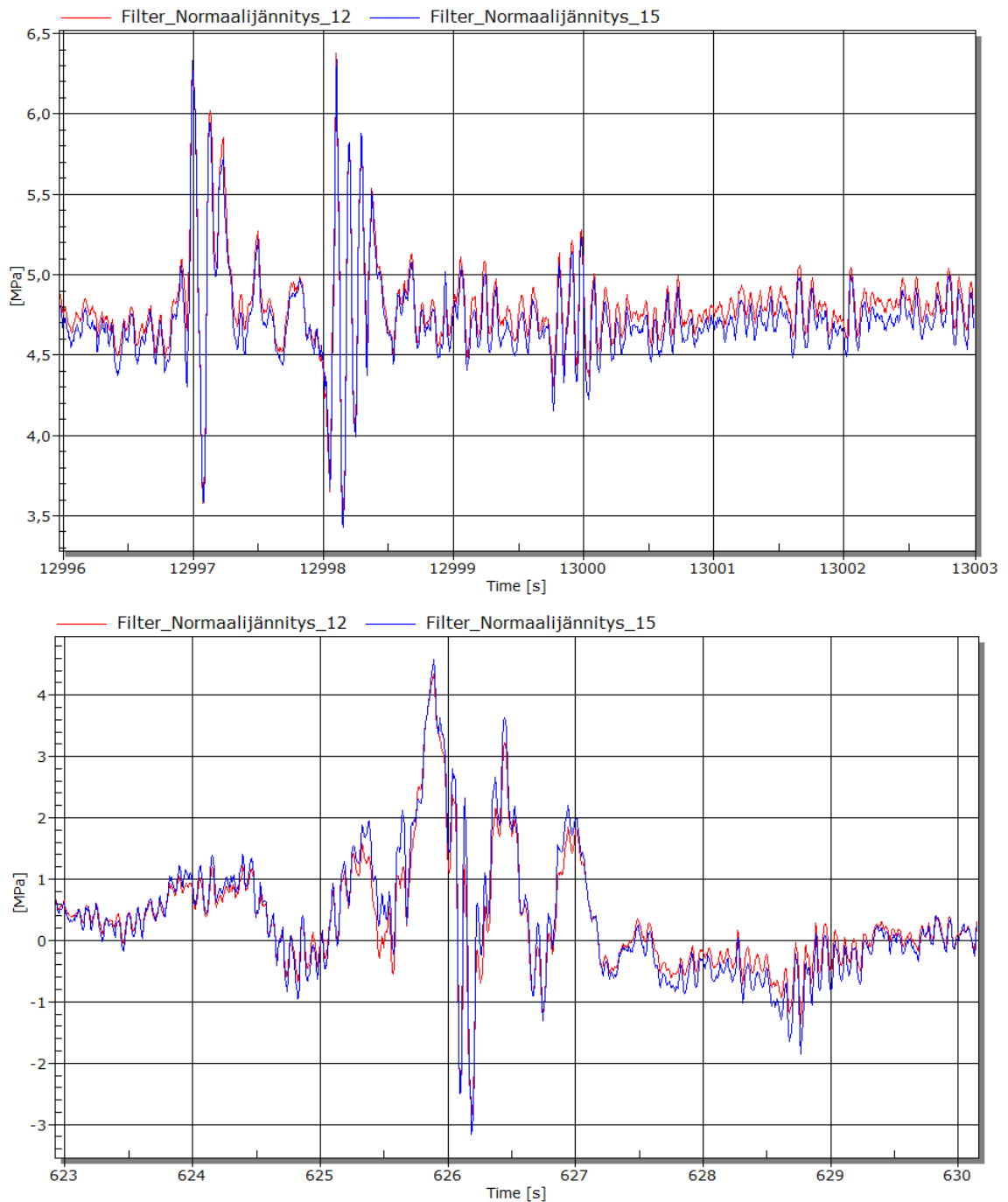
**Kuva 6.12.** Kahden tyhjennyksen vaikutus konsolin jännitykseen

Kuvassa 6.13 havainnollistetaan etummaisen konsolin käyttäytymistä ajettaessa hidasteeseen. Kuvassa yläpuolella oleva kuvaaja on kuormaton tilanne ja alempi on täyteen kuormattu. Kuormattomassa vaikuttaisi tulevan kaksi jännityshuippua ja jännitys tasaantuu nopeasti. Kuormatussa vaunussa huippuja on useita ja tasaantuminen hitaampaa, johtuen nesteen liikkeestä. Aikaikkuna on noin 7 sekuntia. Huomattavaa on, että kuormaamattomana jännitykset pysyvät lähes kokonaan positiivisina, eli normaalijännitys on vedon puolella. Jännityksen keskiarvo on pieni, FEM-mallista arvioidun jännityksen luokkaa.



**Kuva 6.13.** Hidasteen vaikutus etummaiseen konsoliin. Ylempi tyhjänä, alempi kuva kuormattuna.

Kuvassa 6.14 käsitellään samoja hidasteita kuin kuvassa 6.13, mutta mitatut jännitykset ovat kolmannelta konsolista. Kyseessä ovat venymäliuskat 12 ja 15. Tässäkin esimerkissä jännitykset ovat kuormaamattomassa tapauksessa positiivisia, eli vetoa. Taaemmassa konsolissa jännitykset ovat enemmän positiivisella puolella kuin etummaisessa.



**Kuva 6.14.** Hidasteen vaikutus kolmanteen konsoliin. Ylempi kuvaaja ilman kuormaa, alempi kuormattuna

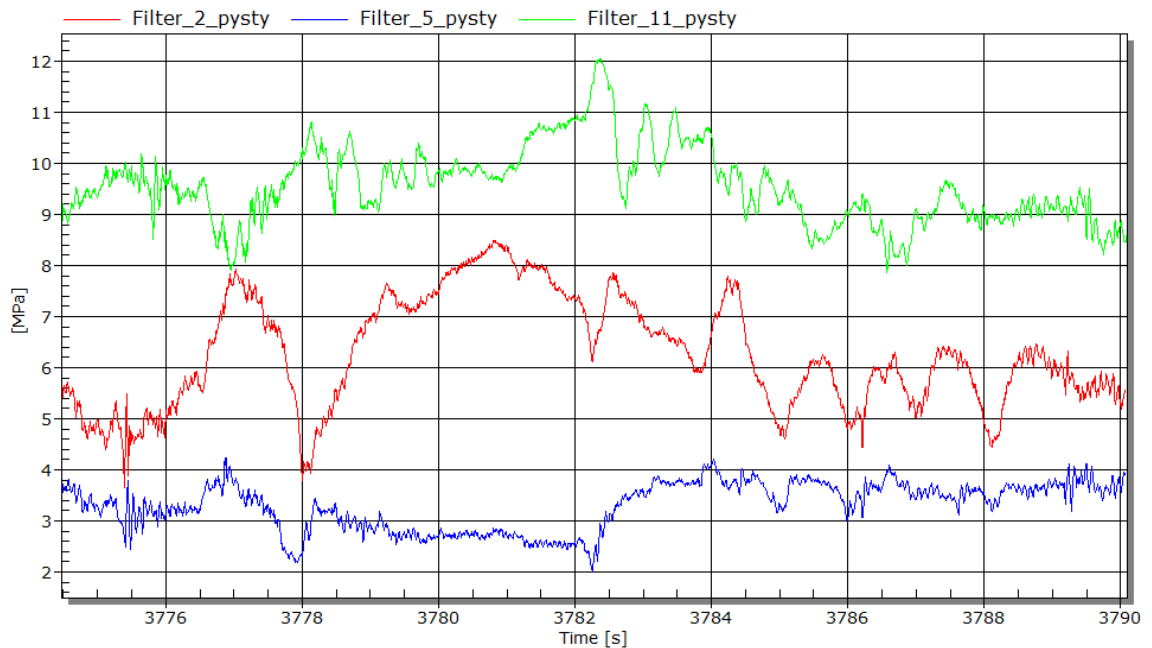
## 6.5 Toisen mittauksen tulokset

Toisessa mittauksessa päähuomio on saumoissa olevissa venymäliuskoissa. Sauman suuntainen ja poikkisuuntainen venymä mitattiin erikseen. Näin pystytään tarkastelemaan sauman ylä- ja alareunassa tapahtuvaa venymää sekä niiden eroa. Venymäliuskat ovat samoja kuin ensimmäisessä mittauksessa, mutta tallennustapa on erilainen. Kumpikin kulmaliuskan hiloista tallennettiin eri kanavalle.

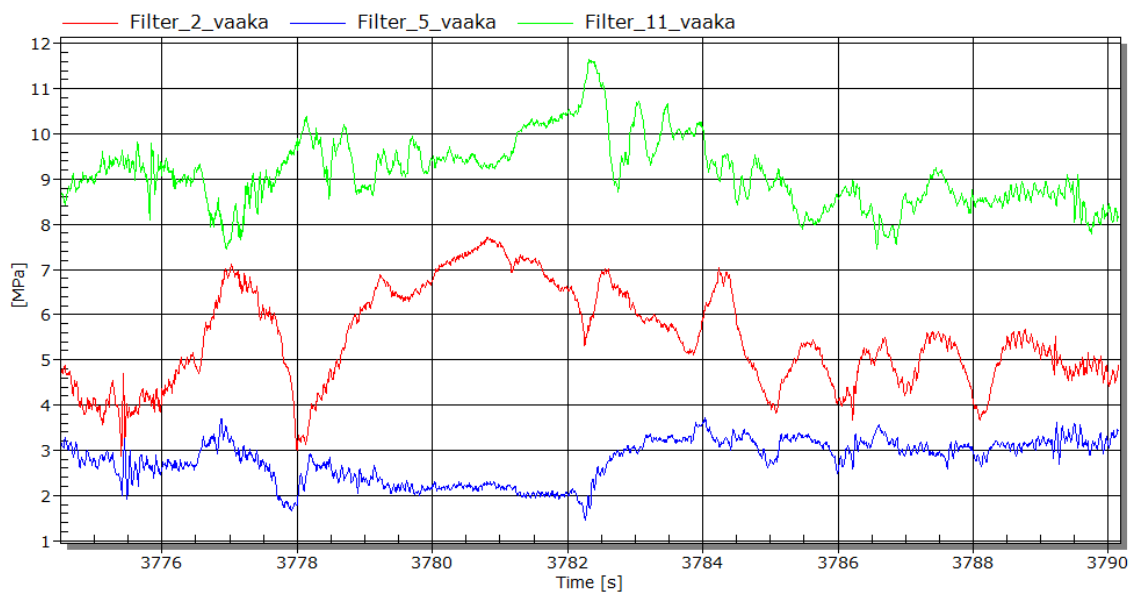
Mittauspisteiden 2, 3, 5, 6, 11, 12, 14, 15 venymäliuskoja tallennettiin. Taaemmassa hitsisaumassa oleva venymäliuska numero 14 irtosi ensimmäisenä

mittauspäivänä. Kanavan nimessä vaaka tarkoittaa vaakatason suuntaista hilaa, pysty puolestaan pystysuuntaista hilaa.

Kuvassa 6.15 on nähtävissä hetkellä 3777 s ajetun töyssyn kuormitus. Jännitykset etummaisessa konsolissa kasvavat, taaemman konsolin saumaan kohdistuu eniten vetoa. Etummaisessa konsolissa yläreunassa jännitysmuutokset ovat suurempia kuin alareunassa. Kuvassa 6.16 vastaava tilanne, mittaus tehty poikittain saumaan nähden.



**Kuva 6.15.** Hidasteen vaikutus saumaan nähden pitkittäissuuntaiseen venymään.

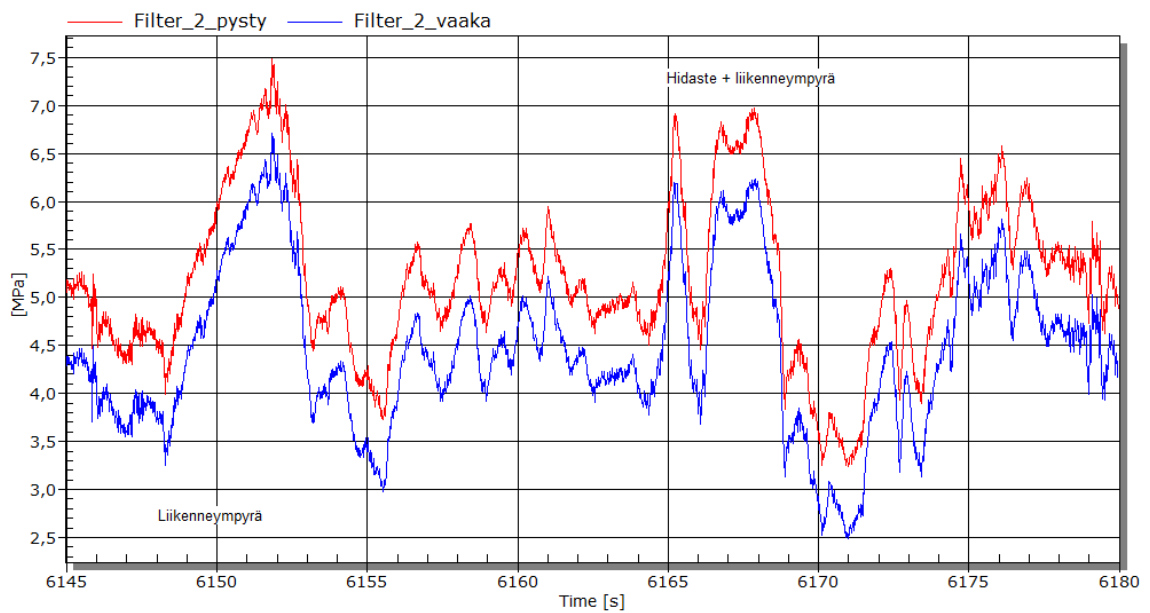


**Kuva 6.16.** Hidasteen vaikutus saumaan nähden poikittaissuuntaiseen venymään.

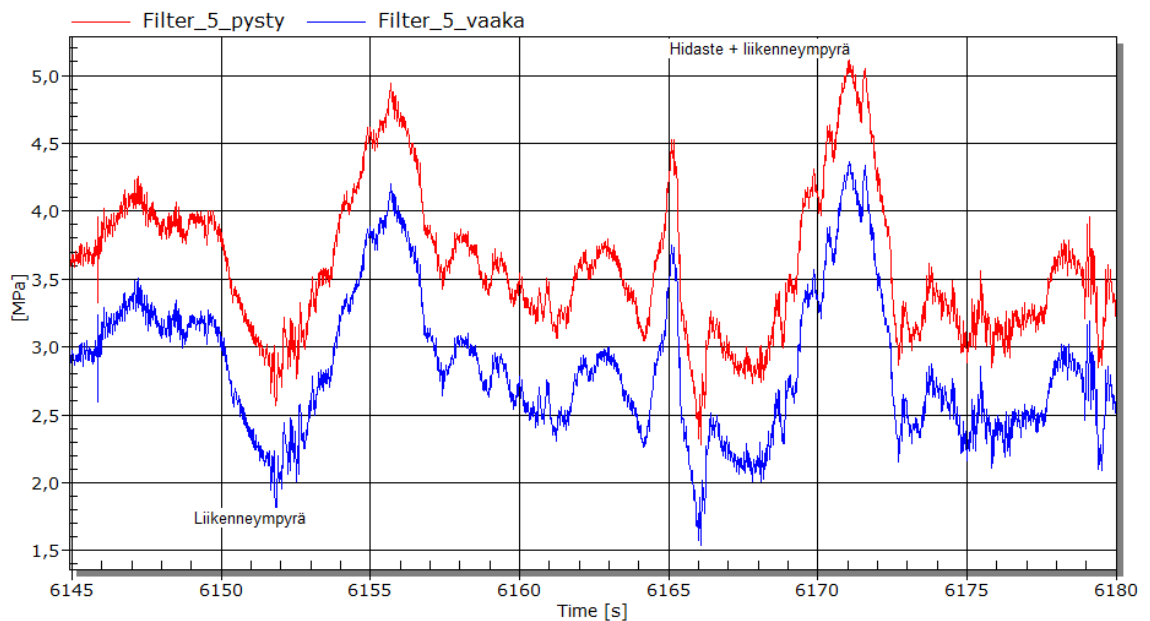


Huomattavaa verrattaessa kuvia 6.15 ja 6.16 on jännityksen käyttäytyminen. Takana olevassa saumassa ilmenee puristusta ja etummaisessa vetoa ajettaessa samaa esteeseen. Samassa saumassa olevan liuskan jännityksen muutos on samankaltainen, mutta jännitykset ovat suuremmat sauman yläreunassa.

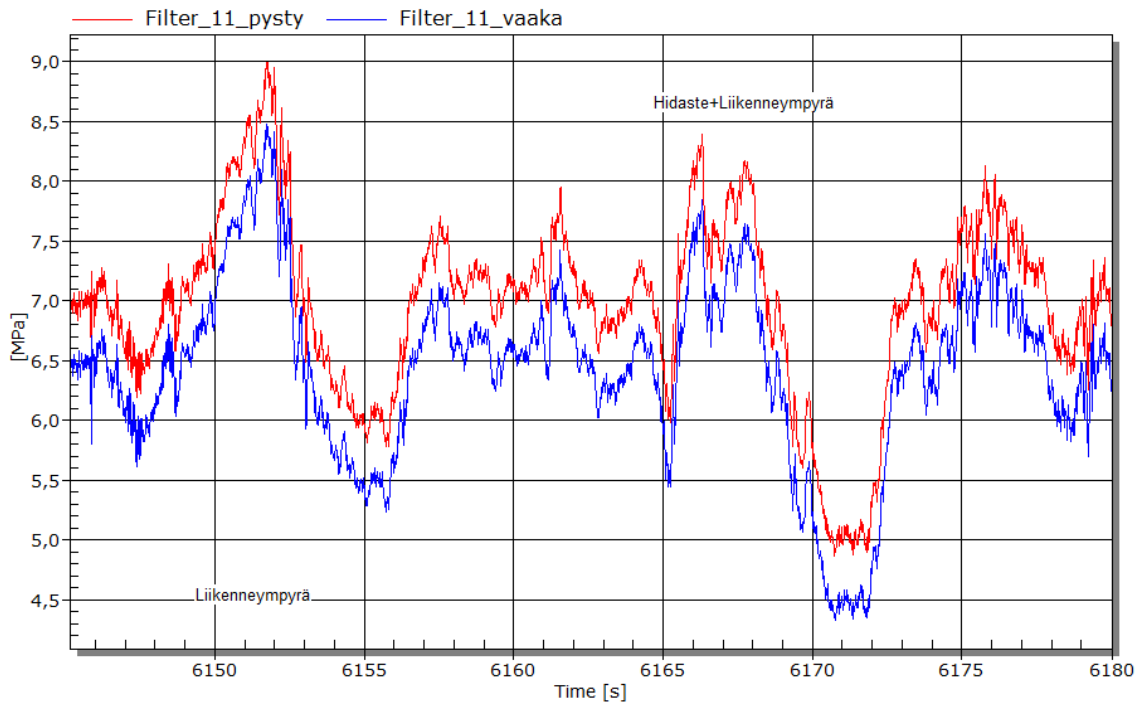
Kuvissa 6.17, 6.18 ja 6.19 samassa kuvaajassa on esitetty kyseisen venymäliuskan pysty ja vaakasuuntainen komponentti. Saman mittapisteen pituus ja poikkisuuntaiset venymät noudattavat hyvin paljon käyttäytymiseltään toisiaan. Tämä oli odotettavissa, jännityksen muutos ei tapahdu yksittäin pituus- tai poikittaissuunnassa



**Kuva 6.17.** Etummaisen sauman yläreunassa tapahtumat jännitysmuutokset.



**Kuva 6.18.** Kuvan 7.17. tilanne alasaumoissa.

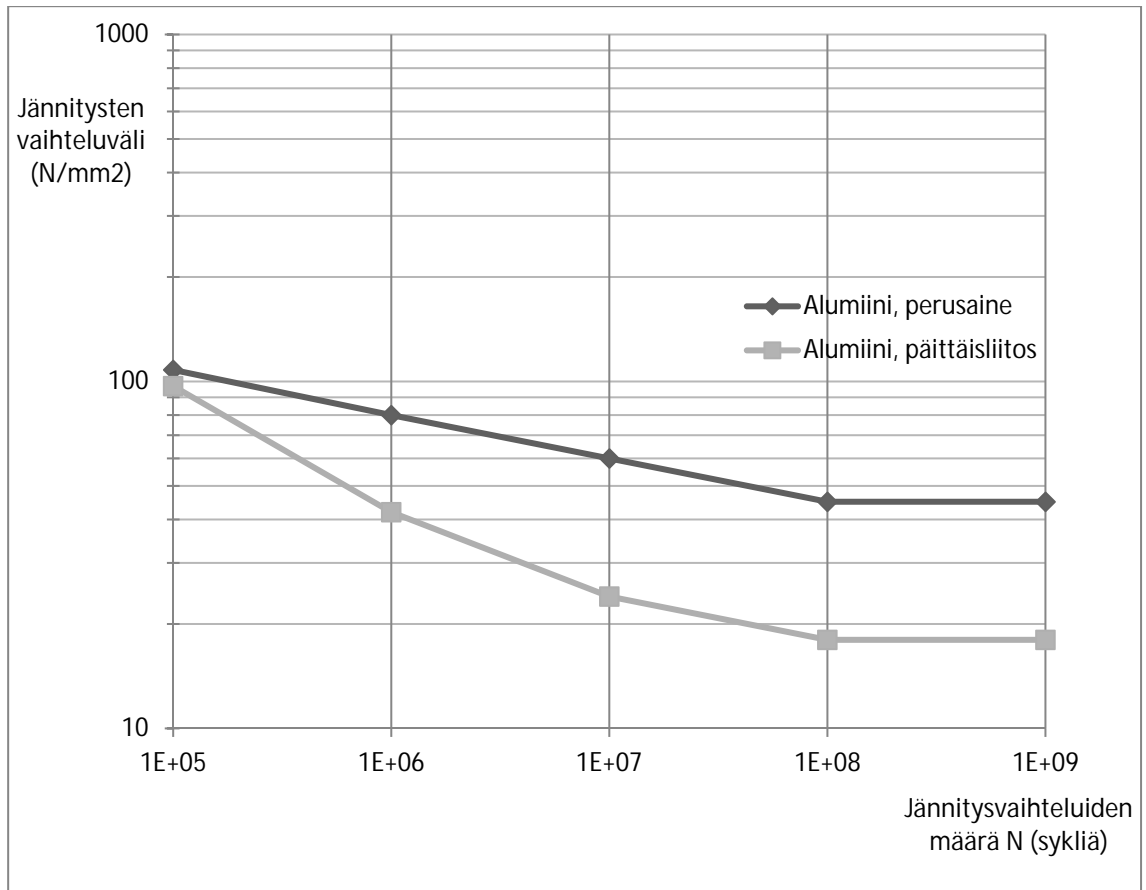


**Kuva 6.19.** Mittauspiste 11 jännitys käyttäytyminen liikenneympyrässä ja hidasteessa.

## 6.6 Väsymisanalyysi

Väsyminen tarkastellaan Minerin säännöllä, jonka vuoksi mittaustuloksille suoritettiin Rainflow – analyysi. Alumiinin Woehler – käyrien erittäin heikosta saatavuudesta johtuen joudutaan kestoikää laskettaessa käyttämään karkeaa arviota. Kuvan 6.20 Woehler -käyrissä näkyy päittäishitsin ja perusaineen kestoiän eroa. Työn laskelmissa on käytetty päittäishitsin käyrää, joka on lähempänä todellista tilannetta kun perusaineen käyrä. Kuvasta 6.20 näkee selvästi, kuinka hitsaaminen alentaa rakenteen kestoikää.

Väsymistarkastelua tulee kuitenkin pitää viitteitä antavana analyysinä. Woehler käyrät ovat arvioita levymäisille/sileille kappaleille. Tutkittavassa kappaleessa muodot ovat kuitenkin monimutkaisia ja rakenne on varmasti herkempi väsymiselle. Monenlaiset lovet ja epäjatkuvuuskohdat altistavat sauman heremmäksi väsymiselle.



**Kuva 6.20.** Vertailuesimerkki alumiinin perusaineen sekä päittäishitsin väsymiskäyristä [5]

### 6.6.1 Ajovuoron aikaiset syklit

Ensimmäisen mittauspäivän tuloksista saadaan yhteenlaskettuna yhden ajovuoron aiheuttama kumulatiivinen vaurio. Ajovuoroja on yleensä kaksi vuorokaudessa. Tätä käyttämällä voidaan arvioida kestoikä. Neljän erillisen mittauksen Rainflow -analyysin tulokset ovat yhteenlaskettuna alla olevassa taulukossa 6.5.

**Taulukko 6.5.** Yhden ajopäivän aikaiset syklit jaettuna eri luokkiin.

<b>Luokka (MPa)</b>	<b>0-5</b>	<b>5-15</b>	<b>15-25</b>	<b>25-35</b>	<b>35-45</b>	<b>45-55</b>	<b>55-65</b>	<b>65-75</b>	<b>75-85</b>	<b>85-95</b>
Piste 1	9283	1142	80	17	0	0	0	0	0	0
Piste 2	8870	38147	1740	141	21	10	1	0	0	0
Piste 3	9274	2400	191	31	12	4	0	0	0	0
Piste 4	8999	17026	609	66	6	0	0	0	0	0
Piste 5	9189	6718	245	28	5	0	0	0	0	0
Piste 6	9250	1496	134	8	1	0	0	0	0	0
Piste 7	9311	56	0	0	0	0	0	0	0	0
Piste 8	8835	21175	2630	547	128	76	23	11	7	7
Piste 9	9297	147	62	47	38	24	12	12	8	226
Piste 10	8927	18571	332	38	6	1	0	0	0	0
Piste 11	9001	13087	730	64	9	0	0	0	0	0
Piste 12	9151	6966	284	52	17	6	2	0	0	0
Piste 13	8930	25027	1572	131	27	6	0	0	0	0
Piste 14	9302	617	1	0	0	0	0	0	0	0
Piste 15	9073	12837	727	109	31	13	7	4	0	0
Piste 16	9283	197	8	1	0	0	0	0	0	0

### 6.6.2 Kumulatiivinen vaurio

Lasketaan kaavan 21, eli Miner-Palmgren säännön mukaisesti rakenteelle päivän aikana syntyvä kumulatiivinen vaurio. Johtuen alumiinin Woehler -käyrästöjen erittäin heikosta saatavuudesta, joudutaan käyttämään karkeaa approksimaatiota alumiinin hitsisauman ja perusaineen kestoiästä eri kuormituksilla. Sarakkeet, joiden arvo  $N_i$  on 0, kestoikä on ääretön. Nämä arvot voidaan Minerin teoriassa jättää huomiotta, sillä mikä tahansa luku jaettuna äärettömällä lähestyy nollaa. Taulukko 6.6:ssa on esitetty kuvan 6.20 Woehler -käyrien mukaiset kestoiät alumiinin päittäishitsiliitokselle eri kuormitusyyskeillä. Taulukko 6.7 sisältää vastaavat arvot perusaineelle.

**Taulukko 6.6.** Kestoikä luokittain alumiinin päittäishitsille.

<b>Luokka</b>	<b>0-5</b>	<b>5-15</b>	<b>15-25</b>	<b>25-35</b>	<b>35-45</b>	<b>45-55</b>	<b>55-65</b>	<b>65-75</b>	<b>75-85</b>	<b>85-95</b>
$N_i$	-	-	$10^7$	$2.5 \cdot 10^6$	$8 \cdot 10^5$	$5 \cdot 10^5$	$3 \cdot 10^5$	$2 \cdot 10^5$	$1.5 \cdot 10^5$	$10^5$

**Taulukko 6.7.** Kestoikä luokittain alumiinin perusaineelle.

<b>Luokka</b>	<b>0-5</b>	<b>5-15</b>	<b>15-25</b>	<b>25-35</b>	<b>35-45</b>	<b>45-55</b>	<b>55-65</b>	<b>65-75</b>	<b>75-85</b>	<b>85-95</b>
$N_i$	-	-	-	-	$10^8$	$2 \cdot 10^7$	$5 \cdot 10^6$	$2 \cdot 10^6$	$6 \cdot 10^5$	$3 \cdot 10^5$

Mittauspisteiden 2,5,11, 14 sekä 16 laskennassa on käytetty taulukon 6.6 päittäisliitoksen arvoja, sillä mittauspisteet ovat hitsisaumassa. Muissa mittauspisteissä on käytetty taulukon 6.7 arvoja perusaineelle.

Lasketaan Minerin säännön mukaisesti kumulatiivinen vaurio jokaiselle mittauspisteelle 1-16. Alla on mittauspisteen kaksi laskenta esimerkkinä ja lopulliset tulokset jokaisesta mittauspisteestä on esitetty taulukossa 6.8. Kaikkien mittauspisteiden laskelmat on esitetty liitteessä 2.

Mittauspiste 2

$$D_2 = \sum_{i=j}^k \frac{n_i}{N_f} = \frac{1740}{10^7} + \frac{141}{2.5 * 10^6} + \frac{21}{8 * 10^5} + \frac{10}{5 * 10^5} + \frac{1}{3 * 10^5} + \frac{0}{2 * 10^5} + \frac{0}{1.5 * 10^5} + \frac{0}{10^5} = 2.8 * 10^{-4}$$

**Taulukko 6.8.** Yhden ajovuoron aikana aiheutunut kumulatiivinen vaurio mittauspisteittäin

Piste	1	2	3	4	5	6	7	8
D <sub>i</sub>	0	2.8*10 <sup>-4</sup>	3.2*10 <sup>-7</sup>	5.0*10 <sup>-8</sup>	4.2*10 <sup>-5</sup>	10 <sup>-8</sup>	0	5.0*10 <sup>-4</sup>
Piste	9	10	11	12	13	14	15	16
D <sub>i</sub>	7.7*10 <sup>-4</sup>	1.1*10 <sup>-7</sup>	1.1*10 <sup>-4</sup>	8.7*10 <sup>-7</sup>	5.7*10 <sup>-7</sup>	1.0*10 <sup>-7</sup>	4.3*10 <sup>-7</sup>	1.2*10 <sup>-6</sup>

Kuten väsymisteorian yhteydessä käsiteltiin, kumulatiivisen vaurion tulisi olla lähellä arvoa yksi, jotta vaurio ilmenee. Suurin vauriosumma on mittauspisteessä yhdeksän.

$$D_9 = 7.7 * 10^{-4}$$

kyseessä on yhden ajovuoron aikainen vaurio. Jotta summan arvoksi saataisi 1, tulisi ajovuorojen lukumäärän olla

$$\frac{1}{D_9} = 1298$$

Kestoikä olisi noin 1300 ajovuoroa. Ajopäivän aikana ajetaan usein kaksi vuoroa, joten viiden ajopäivän viikkoina kestoikä on noin se tarkoittaa noin kahta ja puolta vuotta. Mittauspiste 9 sijaitsee pystylevyssä, jossa ei ole suurta särön ydiintymisen vaaraa. Alueella ei ole esiintynyt ongelmia, eikä alue ole analyysissä suurimman kiinnostuksen kohteena.

Tarkastellaan mikä on vaurioherkin alue konsolin ja pystylevyn rajapintojen läheisyydessä. Tarkastellaan mittauspisteitä 1-6 sekä 10–16. Odotetusti suurin arvo

sijaitsee etummaisessa konsolissa mittauspisteessä kaksi. Kyseinen mittapiste on hitsisauman yläreunassa, juuri kyseisellä alueella josta särön oletetaan ydiintyvän. Mittauspisteen kumulatiivinen vaurio on

$$D_2 = 2.8 * 10^{-4}$$

Jolloin odotettu ajovuoromäärä vaurioitumiseen on

$$\frac{1}{D_2} \approx 3571$$

Tarkottaen kahden vuoron päivätahdilla ja 5 päivän ajoviikolla 1786 ajopäivää eli alle seitsemän vuotta. Arvio kestoistä on suuruusluokaltaan realistinen, mutta todellisen tilanteen kestoikä on todennäköisesti vielä tätäkin alhaisempi.

Huomioitavaa on myös että molempien hitsisaumojen yläreunan kumulatiivinen vaurio on suurempi kuin alareunan. Tämä tukee oletusta sauman yläreunassa ydiintyvistä väsymismurtumasta. Etummaisessa saumassa yläreunan vaurio on yli kuusinertainen sauman alareunaan nähden. Taaemman konsolin saumassa ero on vieläkin suurempi. Yläreunan kumulatiivinen vaurio on yli tuhatkertainen alareunaan nähden, mutta alareunan kestoikä on ääretön, joten vertailu on tässä tapauksessa turhaa.

## 6.7 Johtopäätökset

Väsymismurtuman riski tarkasteltiin Minerin teorialla. Minerin teoriassa käytetyt kestoien arvot ovat arvioita päittäishitsille sekä perusaineelle. Mittauksen tilanne ei ole täysin vastaava, mutta arvoja voidaan käyttää arviona. Nurkkahitsi on päittäishitsiä väsymisherkeampi ja lisäksi rakenteen muoto altistaa rakenteen särön ydiintymiselle. Taulukossa 6.8 on esitetty Minerin teorian mukainen kumulatiivisen vaurion osuus jokaiselle mittauspisteelle. Mittaukset antavat viitteitä mahdolliseen väsymismurtuman vaaraan. Tuloksia tarkasteltaessa tulee muistaa, että arvot ovat optimistisia kestoien kannalta. Laskennallinen kestoikä on vain 7 vuotta, joka on kyseisessä käytössä olevalle vaunulle liian alhainen.

Rakenteessa esiintyy ajoittain suuria jännityshuippuja, jotka voivat olla pääsyy murtumaan. Mittauksissa myötöraja ylittyi, mutta murtoraja ei ylittynyt. Mittauspäivän aikaiset suurimmat vaihtojännitykset on esitetty oheisessa taulukossa 6.9.

**Taulukko 6.9.** Mittauspäivän aikana esiintyneet suurimmat vaihtojännitykset

KANAVA	1	2	3	4	5	6	7	8
$\sigma_w$	103,450	125,410	142,040	45,340	115,990	77,550	27,260	215,04
KANAVA	9	10	11	12	13	14	15	16
$\sigma_w$	17,981	83,688	85,710	147,180	111,020	17,747	193,860	62,654

## 7 FEM-MALLINNUS

Työssä FEM-mallinnusta käytettiin apuvälineenä kahdessa vaiheessa. Venymämittausten todenmukaistamiseksi vaunun oman massan aiheuttama, mittauspisteissä kuormittamattomana ilmenevä jännitys  $\sigma_m$ , oli selvitettävä perävaunun FEM-mallista. Näin mittausten normaalijännityksien arvoista saatiin todenmukaiset. Lisäksi telialustan muutos ehdotuksen käyttäytymistä tarkasteltiin FEM laskennalla.

### 7.1 Vaunun painosta aiheutuvat jännitykset

Johtuen telin sekä säiliön omasta massasta venymäliuskojen mittauspisteitä ei saada täysin jännityksettömiksi, vaikka säiliö olisi tyhjä. Vaunun oma massa aiheuttaa jännityksen  $\sigma_m$ , jonka suuruutta ei koeolosuhteissa ole mahdollista mitata.

FEM-mallista saatiin hyvä arvio jokaisen anturin jännitykselle kuormaamattomassa tilassa. Tyhjän vaunun mittapisteiden jännityksien arvot löytyvät taulukosta 7.1. Jännitysten taso suhteessa mitattuihin jännityksiin on odotetusti erittäin alhainen. Mittapisteiden sijainnit käsiteltiin kappaleessa kuusi.

**Taulukko 7.1.** Mittapisteiden jännitykset  $\sigma_m$  [MPa]

Piste	1	2	3	4	5	6	7	8
Jännitys	0,05	0,03	0,63	0,10	1,20	1,16	0,14	0,08
Piste	9	10	11	12	13	14	15	16
Jännitys	0,02	0,09	0,31	0,26	0,07	0,53	0,45	0,15

### 7.2 Vaihtoehtoisten rakenteiden analysointi

FEM on tehokas työväline tutkittaessa eri rakennevaihtoehtoja ja ratkaisuja. Ongelmaa ratkaistaessa ensimmäisenä keskustelua käytiin yrityksen suunnittelijoiden ja johdon kanssa. Näiden keskustelujen pohjalta päätettiin tarkasteluun ottaa muutos ehdotus, joka mallinnettiin ja eri tilanteita tarkasteltiin FEM -mallin avulla.

Työssä esitellään vaihtoehtoisen ratkaisun FEM-malli sekä alkuperäisen säiliöperävaunun FEM-malli. Molemmista tapauksista käsitellään lepo, jarrutus sekä kolari tilanteet.

### 7.2.1 Kuormitukset

Suurimmaksi hidastuvuudeksi, joka telialustan tulee kestää, arvioitiin kolarissa ilmenevä 2 g:n hidastuvuus, joka on noin  $19,62 \text{ m/s}^2$ . Tyypillinen tiukassa jarrutuksessa ilmenevä hidastuvuus on  $6 \text{ m/s}^2$ .

Valmistajan ilmoittama suurin sallittu vaunun painon ja nesteen aiheuttama kuorma telille on 25000 kg, suurimman sallitun kokonaismassan ollessa 43000 kg. Näistä saadaan laskettua ajosuuntainen voima sekä massa, joilla analysoidaan teliä FEM-mallia.

Pituusakselin suuntainen kuormitus kolarissa

$$F_1 = ma_1 = 25000 \text{ kg} * 2 * 9,81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} = 490,5 \text{ kN} \quad (22)$$

Pituusakselein suuntainen kuormitus jarrutuksessa

$$F_2 = ma_2 = 25000 \text{ kg} * 6 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} = 150 \text{ kN} \quad (23)$$

Suurin pystysuuntainen kuormitus maksimi kuormalla

$$G = mg = 25000 \text{ kg} * 9,81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} = 245,25 \text{ kN} \quad (24)$$

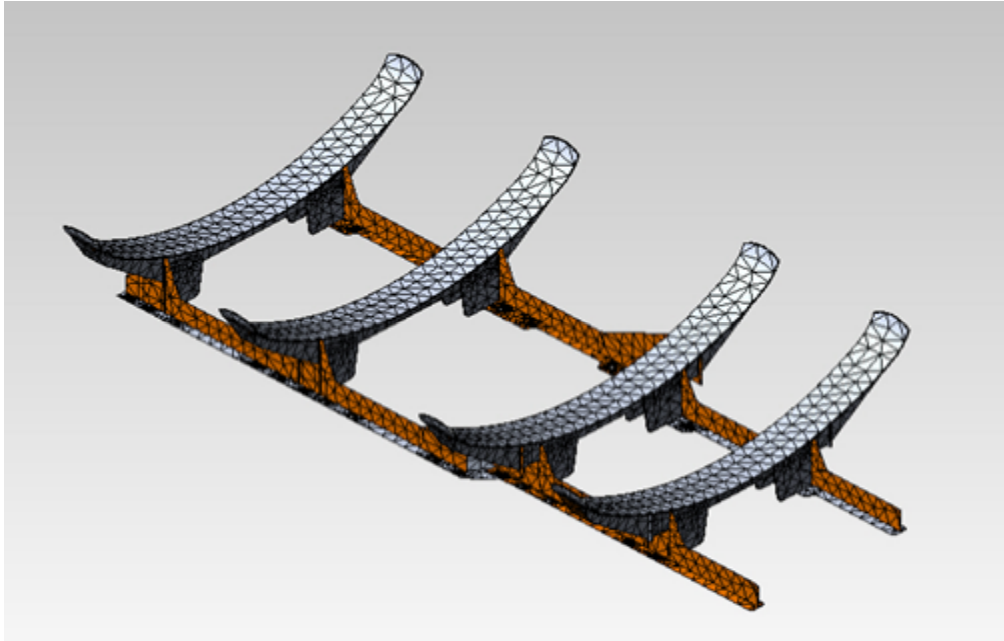
### 7.2.2 Nykyinen rakenne

Nykyisen rakenteen jännityshuiput sijaitsevat odotetusti konsolien ja pystylevyn rajassa rakenteen yläreunassa, kuten kuvasta 7.3 voi havaita. Konsolit kiinnittävä hitsisauma päättyy kyseiselle alueelle ja särön arvellaan ydiintyvän juuri yläreunasta. Kolaritilanteen jännityshuiput nykyisessä rakenteessa on nähtävissä kuvassa 7.2.

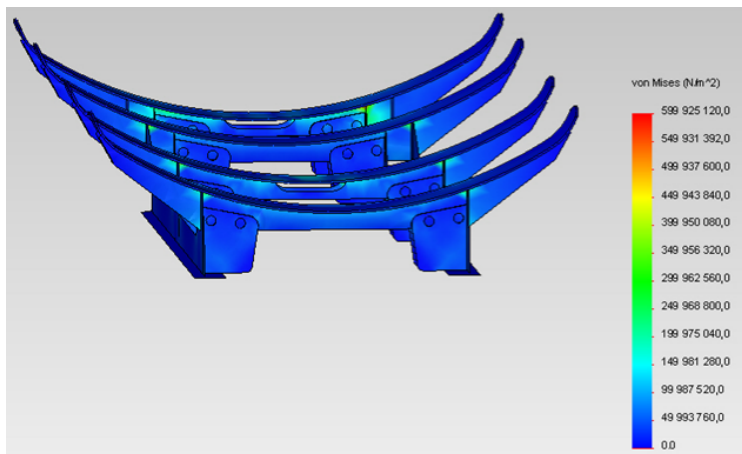
Mallissa osien väliset kontaktit sekä hitsisaumat käsitellään kiinnitettyinä. Laskenta on toteutettu vaunun oma massa huomioiden perävaunun maksimikuormalla. Laskennassa alusta on kiinnitetty telin ja pystylevyn kontaktialueilta. Kuorma on jaettu tasaisesti neljän konsolin yläpintaan. Kolari ja jarrutustilannetta tutkittaessa säiliön kontaktipintaan kohdistettiin normaalivoiman lisäksi vaunun pituusakselin suuntainen jarrutusta vastaava voima. Fem -mallinnuksessa ei käsitelty dynaamisen kuormituksen eikä kaarreajon tilanteita.

Telialustan laskentamallin verkotus näkyy kuvassa 7.1. Malli koostuu 14659 elementistä ja solmupisteitä on 34139. Elementit ovat 4 pisteisiä Jacobian elementtejä.

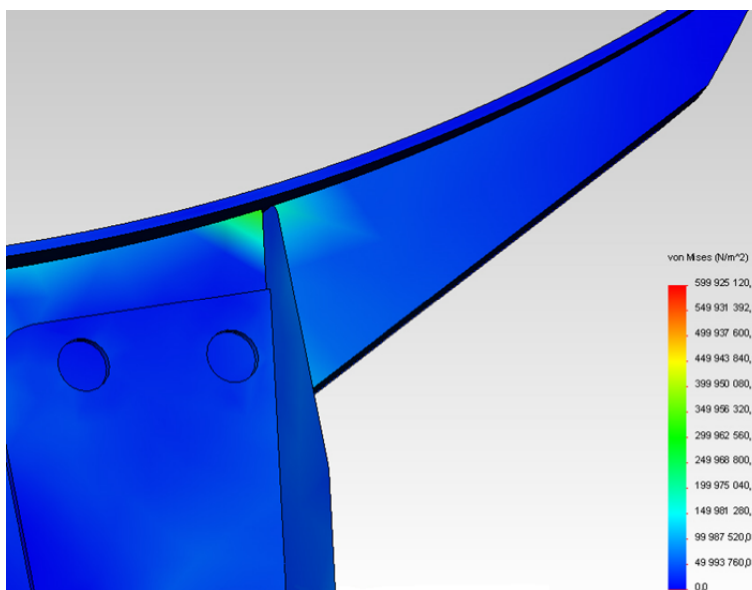




**Kuva 7.1.** Telialustan laskentamallin verkotus



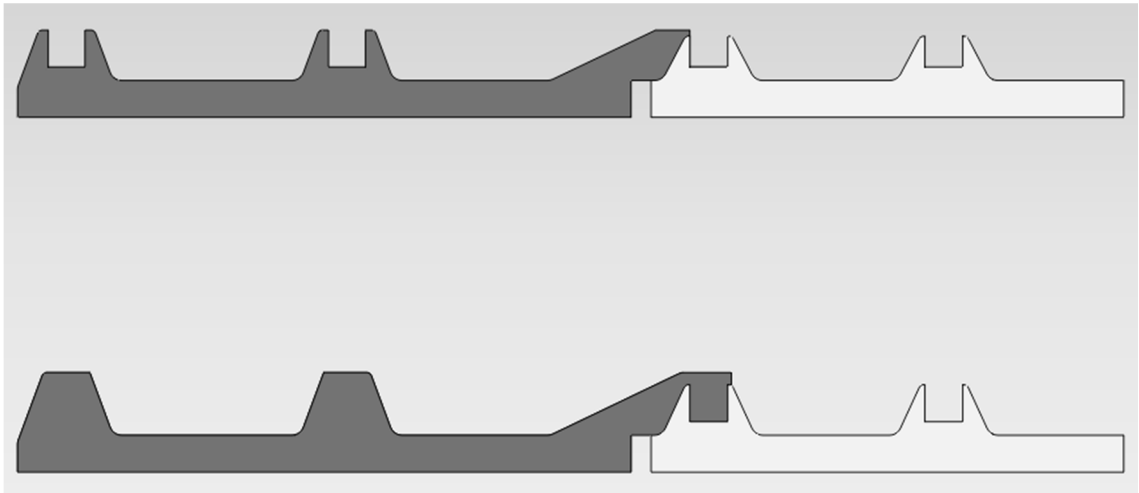
**Kuva 7.2.** Kolarissa esiintyvät jännityshuiput esiintyvät pystylevyn yläreunassa



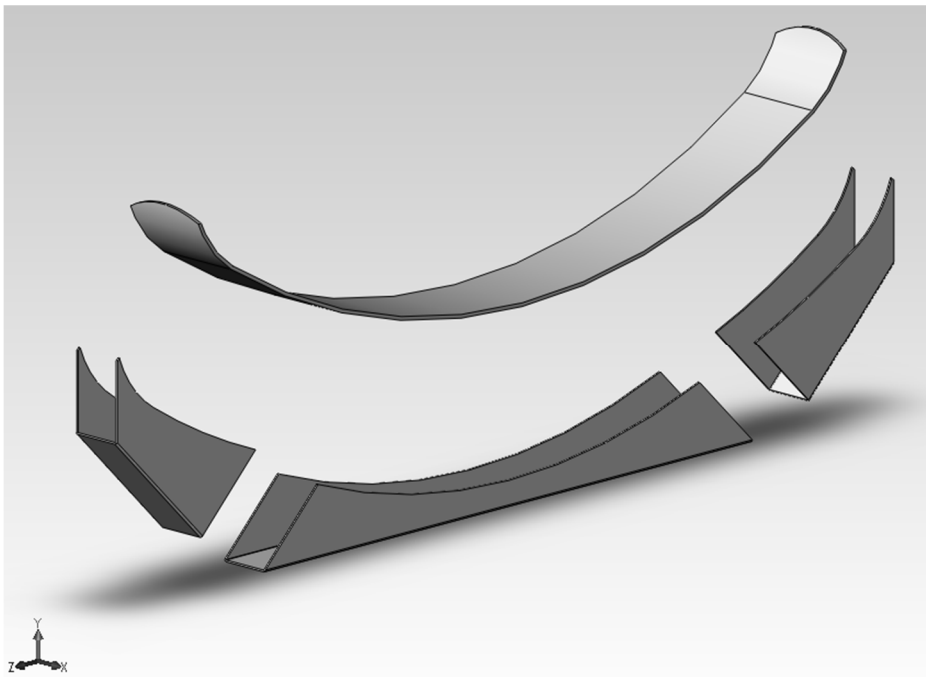
**Kuva 7.3.** Kolaritilanteen jännityshuippu oletetussa särön ydiintymispisteessä

### 7.2.3 Uudistettu rakenne

Uutta rakennetta suunniteltaessa ongelmia sekä ratkaisuja pohdittiin yhdessä kohdeyrityksen kanssa. Suurimpien muutoksien kohteiksi valittiin pystylevyjen sekä konsolien rakenne ja nämä yhdistävä hitsisauma. Murtuvan hitsisauman rakenne pyrittiin saamaan vahvemmaksi sekä poistamaan olemassa ollut tilanne, jossa kuorma siirtyi kokonaisuudessaan hitsisauman lävitse. Konsolit liittävä hitsisauma päätettiin siirtää pois pystylevyjen alueelta ja rakenne viistottiin kuten kuvassa 7.5. Pystylevyt muutettiin siten, että kuorma siirtyy rakenteen kautta. Hitsisaumaan ei kohdistu yhtä suurta kuormaa kun edellisessä rakenteessa. Pystylevyn rakenteen muutosta on verrattu kuvassa 7.4.

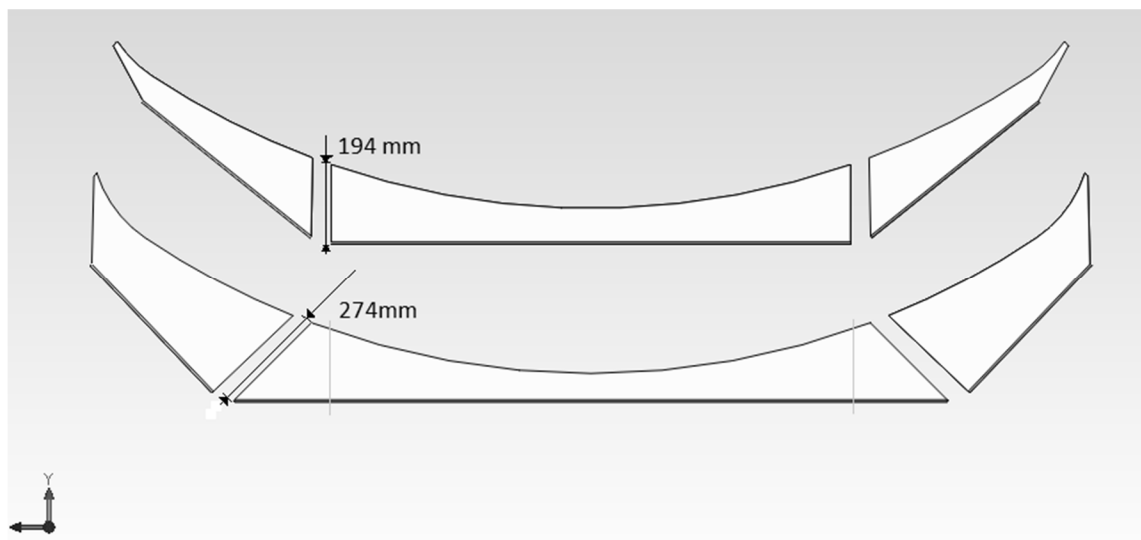


**Kuva 7.4.** Uuden (yllä) ja vanhan pystylevyn rakenne

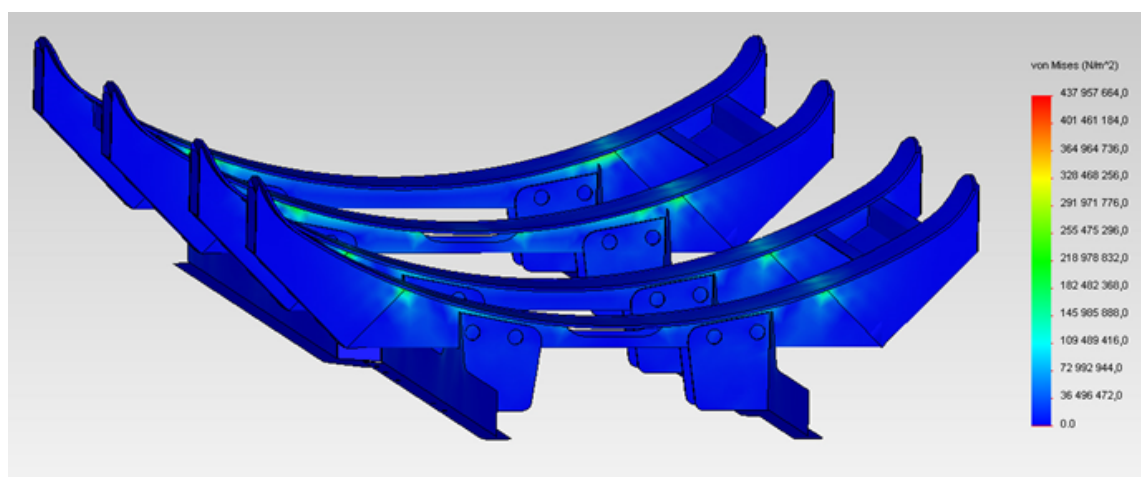


**Kuva 7.5.** Räjätyskuva konsolin muutosehdotuksesta

Kuvassa 7.5 on räjäytyskuva muutosehdotuksen konsolin rakenteesta. Uudessa rakenteesta konsolit yhdistettäisiin suoraan toisiinsa päittäishitseillä. Konsolien liitoskohta viistettiin, jotta saataisiin pidempi hitsisauma yhdistämään konsolien kylkiosat keskiosaan. Konsolien liitoskohta siirrettiin pystylevyjen ulkopuolelle pois rakenteen jännityshuipun alueelta. Viistämisen seurauksena sauma piteni yhteensä 160mm, joka oli tarkoituksenakin. Kuvan 7.6. mukaisesti viistetty sauma kantaa päittäishitsin välityksellä osan kuormasta suoraan levystä toiseen. Kuten kuvassa 7.7 on nähtävissä, jarrutuksen aikaiset jännitykset ovat jakautuneet suurelle alueelle eikä jännityshuippuja rakenteessa esiinny.



**Kuva 7.6.** Kuvaan on merkitty hitsisauman pituus. Yllä nykyinen, alla tutkittu vaihtoehto

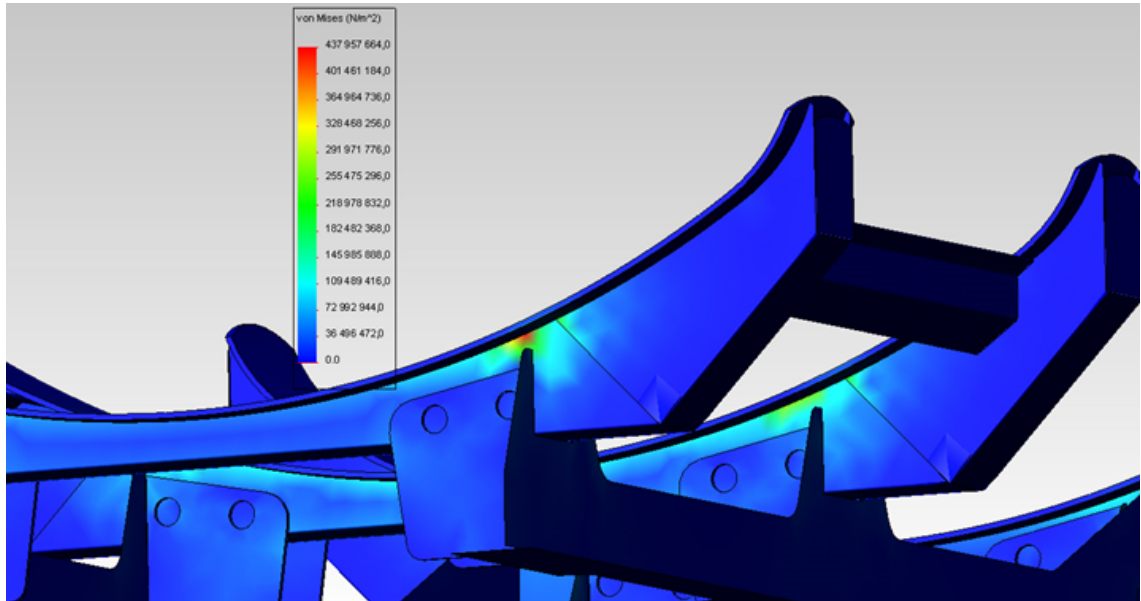


**Kuva 7.7.** Jarrutuksen aikaiset jännitykset muutosehdotuksen mallissa. Kuva perän suunnasta.

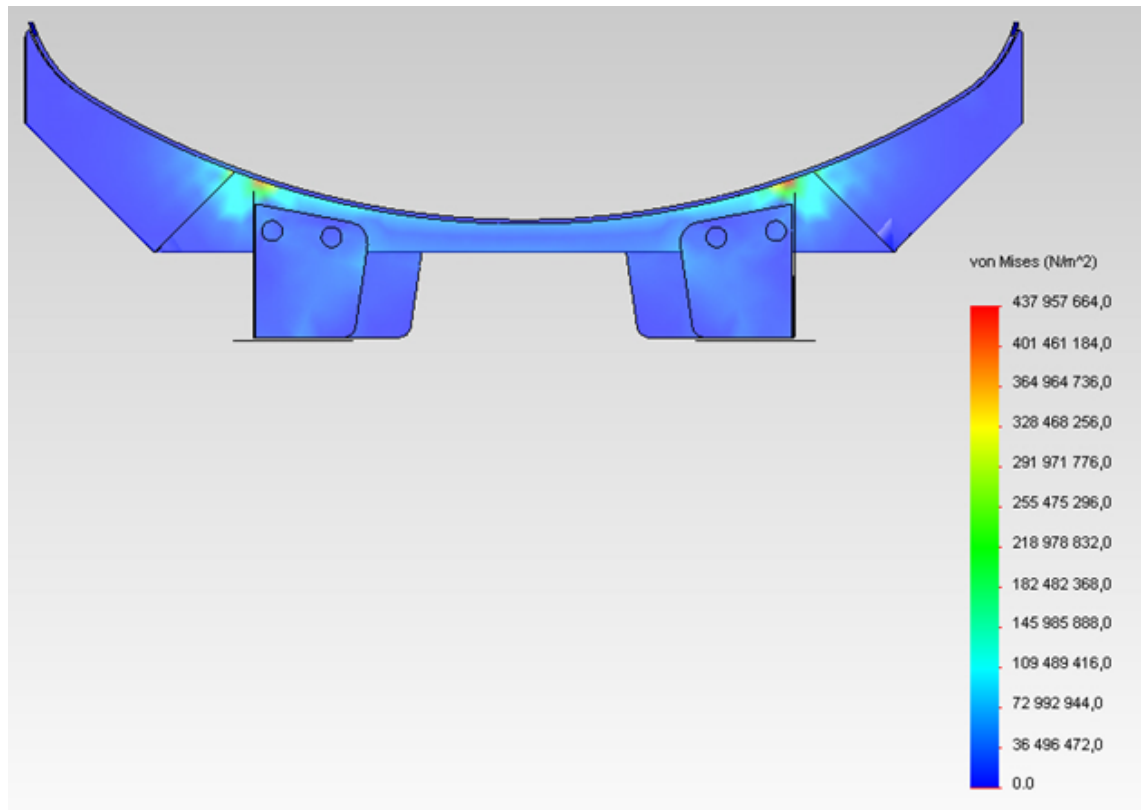
Suurimmat jännitykset esiintyvät edelleen konsolin ja pystylevyn liitoskohdassa. Pystylevyä muutettiin siten, että levyjen muoto kantaa osan kuormasta. Konsolin pohja

lepää pystylevyn kolossa, näin kuormaa siirtyy pois hitsisaumalta. Pystylevyn muutos on esitetty kuvassa 7.4.

Kuten kuvat 7.8 ja 7.9 osoittavat, muutetussa rakenteessa jännityshuiput esiintyvät pystylevyn kohdalla keskikonsolin yläreunassa. Tässä kohtaa ei kuitenkaan ole enää voimia välittävää hitsisaumaa, jossa olisi vaaraa särön ydiintymiselle. Aiemmin murtuneen hitsisauman rakenne on muutettu ja liitos on siirretty pois suurimpien jännityksien alueelta pystylevyjen ulkopuolelle.



**Kuva 7.8.** Kolarin aikaiset jännityshuiput etummaisessa konsolissa.



**Kuva 7.9.** Kolarissa jännityshuiput esiintyvät edelleen pystylevyn kohdalla.

Jännityshuippu on vanhassa rakenteessa takimmaisessa konsolissa, mutta muutosehdotuksessa se on siirtynyt etummaiseen konsoliin. Kolaritilanteen jännityshuippu on merkittävästi suurempi uudessa rakenteessa. Jännityshuippu on pystylevyn kohdalla konsolin yläreunassa. Jännityshuippu on paikallinen ja on muualla rakenteessa jännitykset pysyvät erittäin alhaisina. Uudessa rakenteessa jännityshuipun alueella ei ole hajoavaa rakennetta toisin kuin vanhassa rakenteessa.

## 8 YHTEENVETO

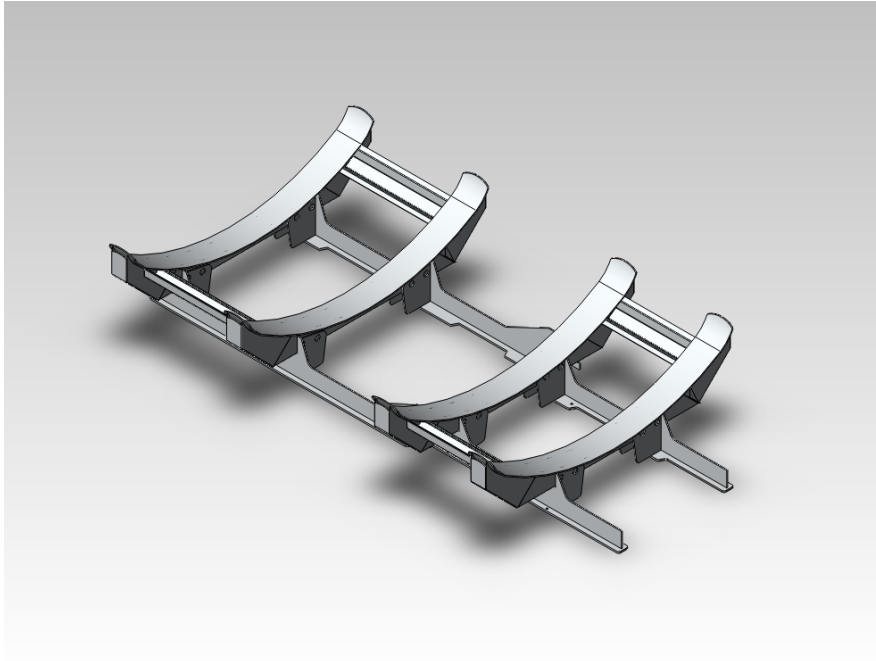
Minerin hypoteesin mukaisen laskennan mukaan rakenteen kestoikä on 7 vuotta. Todellisessa tilanteessa kestoikä on luultavasti tätäkin alhaisempi. Käytetty Woehler – käyrä on tarkoitettu alumiinin perusaineelle ja päittäishitsille, mutta tilanteen nurkkahitsi on väsymisherkempi kuin päittäishitsi. Tästä johtuen hitsisaumalle laskettu kestoikä on luultavasti yläkanttiin. Suuria jännityshuippuja kyllä tavattiin, mutta ne eivät ylittäneet alumiinin murtorajaa eivätkä täten ole suoraan syy rakenteen murtumiseen.

Tyypillisesti hitsatuissa rakenteissa on geometrisia epäjatkuvuuskohtia, kuten kulmia ja sauman päitä. Nämä altistavat sauman särön ydiintymiselle. Lisäksi hitsatessa syntyy usein hitsausvirheitä, kuten sulkeumia, halkeamia tai onteloita. Nämä pyritään karsimaan laadunvarmistuksella. Kaikkia hitsausvirheitä ei pystytä seulomaan pois ja ne voivat johtaa käytön aikaiseen särön ydiintymiseen ja lopulta rakenteen pettämiseen. Tämä voi olla osasy syy murtumalle tai edistävä tekijä särön etenemiselle.

Vaurioitumisen riskiä voidaan alentaa rakenteen uudelleen suunnittelulla. Alkuperäinen rakenne altistaa hitsisauman dynaamiselle kuormalle. Hitsisaumat ovat herkkiä murtumaan tällaisessa tapauksessa. FEM-analyysi paljasti, että koko telialustan jännityshuippu sijaitsee juuri oletetussa särön ydiintymispisteessä eli sauman yläreunassa. Tässä kaikkein herkimmissä paikassa sauman pääty on avoin, lisäksi venymämittauksen tulokset viittaavat, että käännöksissä sauman yläreunaan kohdistuu suuriakin vetojännityshuippuja. Tämä on hitsisaumalle erittäin vaarallinen tilanne. Saumassa esiintyy valtaosan ajasta vetoa, joka edistää ydiintyneen särön etenemistä.

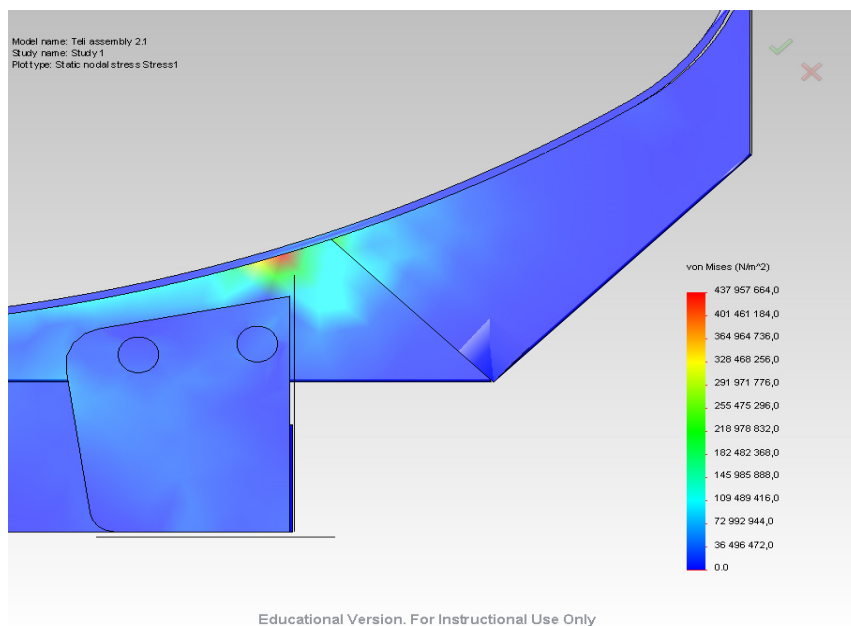
Rakenteessa esiintyvät ongelmat saadaan hyvin todennäköisesti kontrolliin rakenteen uudelleen suunnittelulla ja korjaamalla nämä kaikkein ongelmaherkimmät alueet. Etenkin poistamalla tilanne, jossa hitsisaumaan kohdistuu dynaaminen kuormitus. Vaihtoehtoisen rakenteen laskentamallia on käsitelty kappaleessa 6.2.3 Muutosehdotus. Ajatus on yhtenäistää kolmeosaista konsolia ja täten parantaa konsolien kestävyyttä. Isometrinen kuvanto telialustan rakenteesta on esitetty kuvassa 8.1.

Konsolit yhdistävä hitsisauma on siirretty suurimman jännityksen alueelta pois. Tämä jännitys esiintyy pystylevyn ja konsolin liitoskohdassa. Konsolit yhdistävät saumat ovat pystylevyjen ulkolaidalla. Tällöin pystylevyn kontaktista konsoliin aiheutuvat kuormat eivät ole juuri hitsisauman kohdalla. Konsolit liittävän sauman alueella ei ole yhtä suuria jännityshuippuja. Liitos viistotaan ja sauma pitenee, levyt kantavat osan kuormasta päittäin. Sauma pidentyy kaikkiaan 160 millimetriä kummallakin puolella.



**Kuva 8.1.** Isometrinen näkymä telialustan muutosehdotuksesta

Rakenteeseen tulee yksi liitos lisää, kun pystylevy kolotaan ja hitsataan konsolin keskiosaan kiinni. Kolottu pystylevy kantaa kuorman konsolin pohjasta hitsisauman kanssa, konsolin ja pystylevyn yhdistävä hitsisauma ei altistu yhtä kuormittavaan tilanteeseen. Rakenteen jännityshuippu esiintyy edelleen pystylevyn kohdalla konsolin ylälaidassa, kuvan 8.2 mukaisesti. Alueella ei ole murtumisherkkää saumaa, johon jännitys vaikuttaisi. Voitaneen olettaa, että näillä muutoksilla ongelma korjaantuu.



**Kuva 8.2.** Kuva jännityshuipusta jarrutuksesta

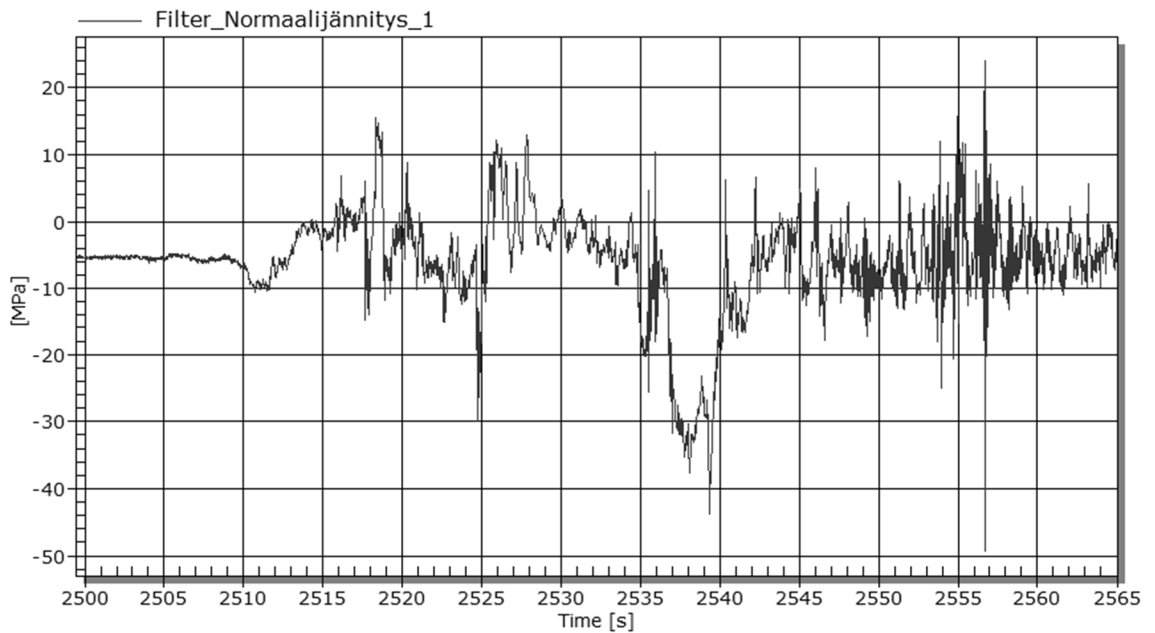
## LÄHTEET

- [1] Airila, M., Ekman, K., Hautala, P., Kivioja, S., Kleimola, M., Martikka, H., Miettinen, J., Niemi, E., Ranta, A., Rinkinen, J., Salonen, P., Verho, A., Vilenius, M., Välimaa, V. P 2003. Koneenosien suunnittelu, 4. painos. Porvoo, WS Bookwell Oy. ISBN 951-0-20172-3. 796 s.
- [2] Outinen, H., Salmi, T. P 2004. Lujuusopin perusteet. Tampere, Pressus Oy. ISBN 952-9835-64-7. 464 s.
- [3] Miettinen, J. P 2010. KSU-3220 Konedynamiikan mittaukset. TTY Konstruktitekniikka. 118 s.
- [4] Norton, R. Machine design an integrated approach, third edition. ISBN 0-13-202012-2. 984 s.
- [5] Lukkari, J. P 2001. Alumiinit ja niiden hitsaus. Tampere, Tammerpaino Oy. ISBN 951-817-756-2. 251 s.
- [6] Kyowa. Measuring Strain with Strain Gages. 30 s.

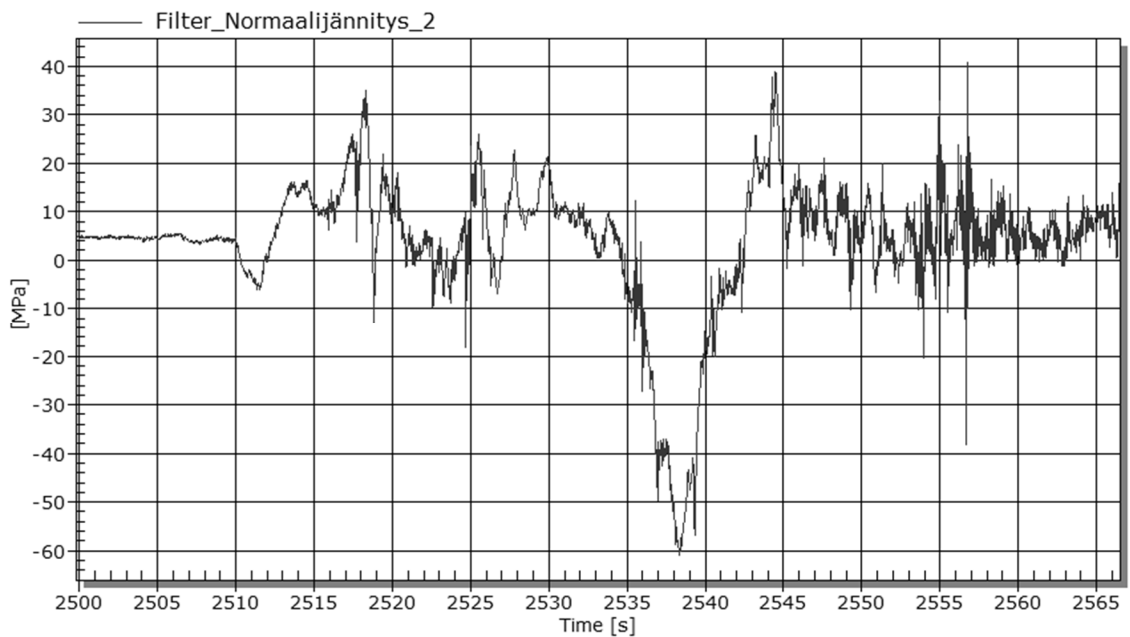


# LIITE 1: NORMAALIJÄNNITYS

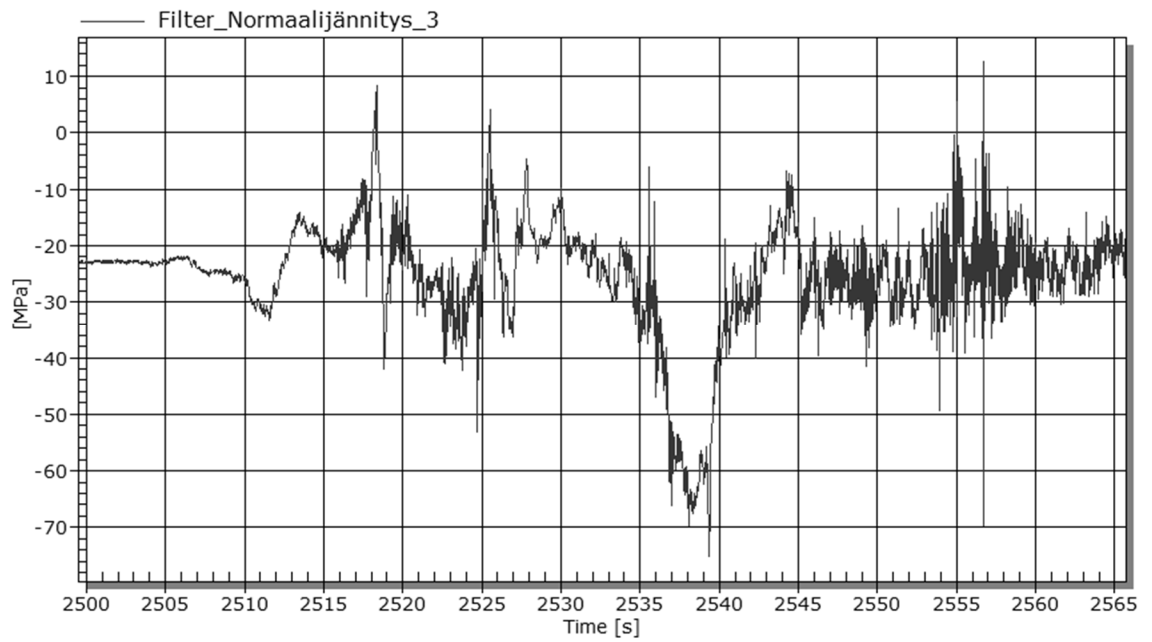
Liitteen kuvissa on esitetty vaunun eri mittapisteiden normaalijännitysten vaihtelu ajettaessa hidasteeseen  $t=2518$  s ja liikenneympyrään  $t=2526$  s. Vaunussa on mittausten aikainen suurin kuorma.



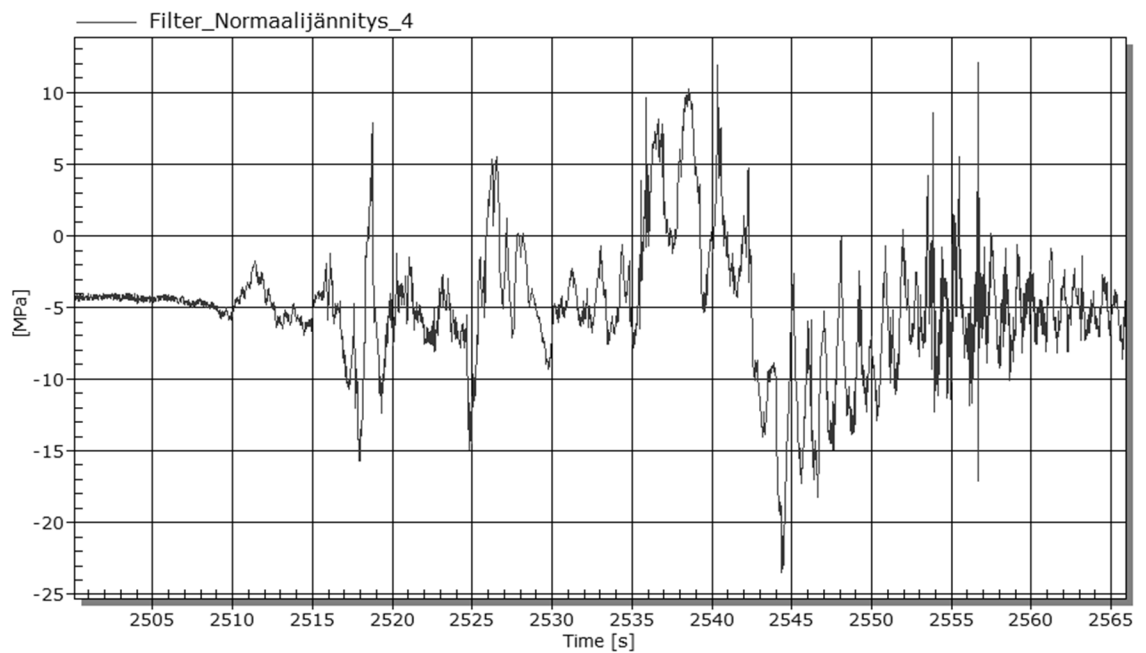
**Kuva 1** Käyttäytyminen hidasteessa sekä liikenneympyrässä. Mittauspiste 1.



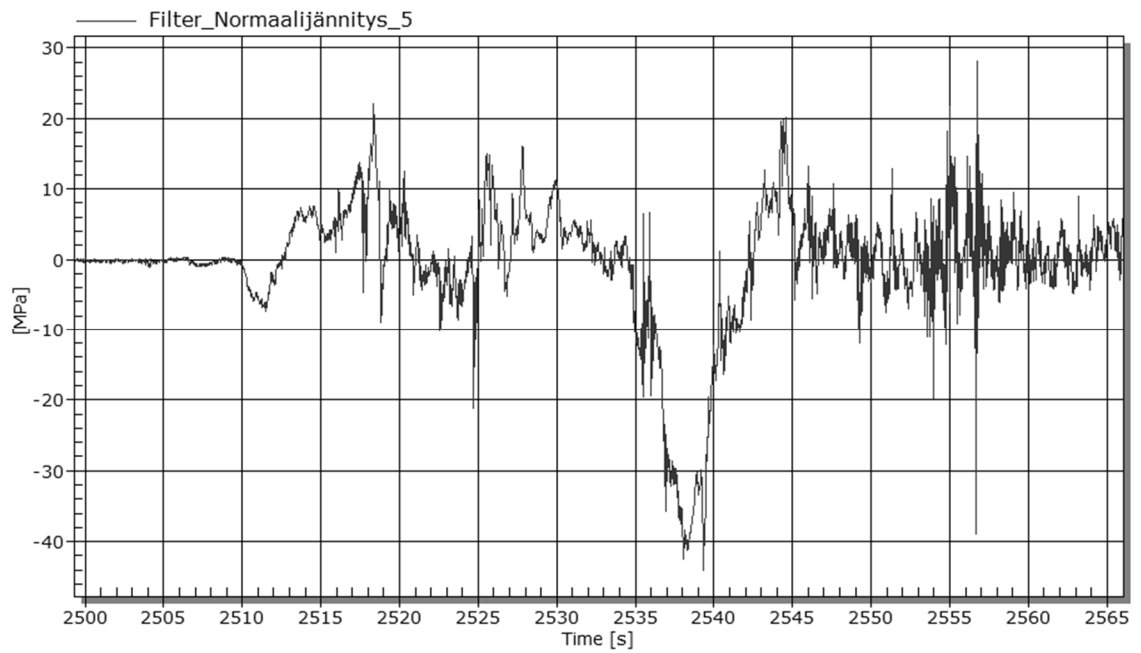
**Kuva 2** Käyttäytyminen hidasteessa sekä liikenneympyrässä. Mittauspiste 2.



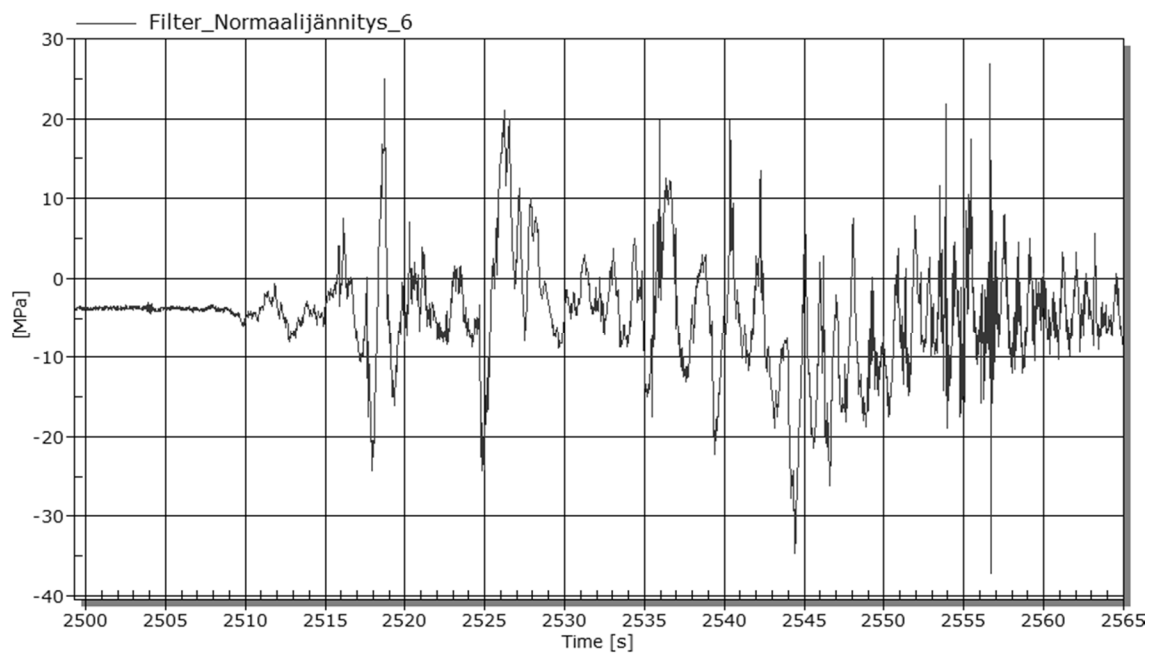
**Kuva 3** Käyttäytyminen hidasteessa sekä liikenneympyrässä. Mittauspiste 3.



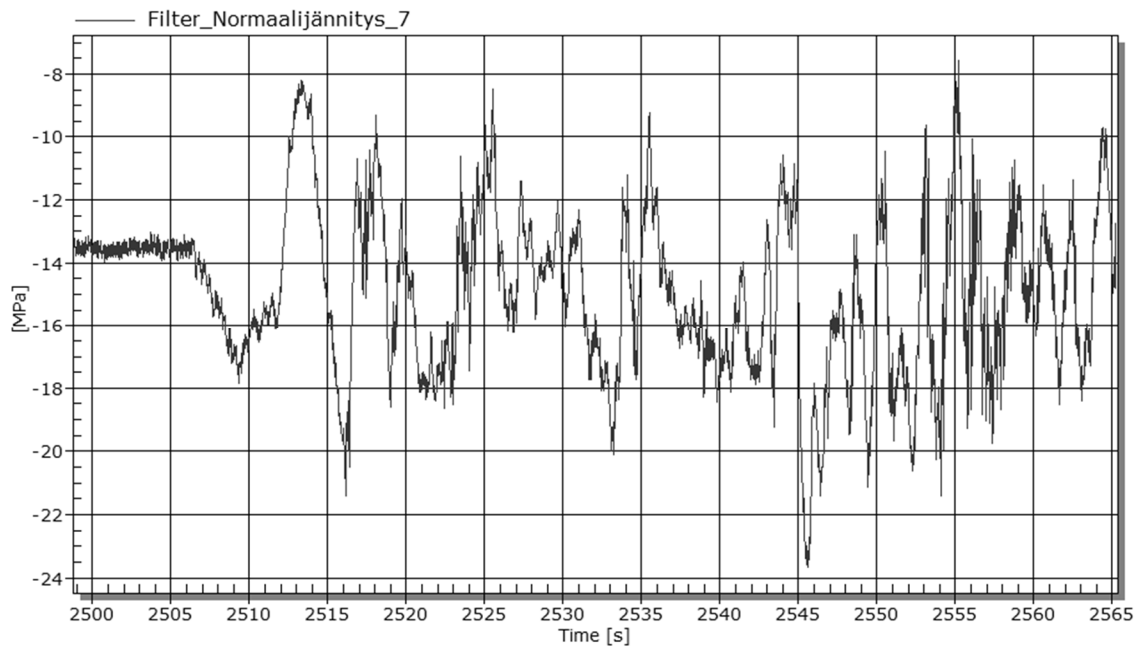
**Kuva 4** Käyttäytyminen hidasteessa sekä liikenneympyrässä. Mittauspiste 4.



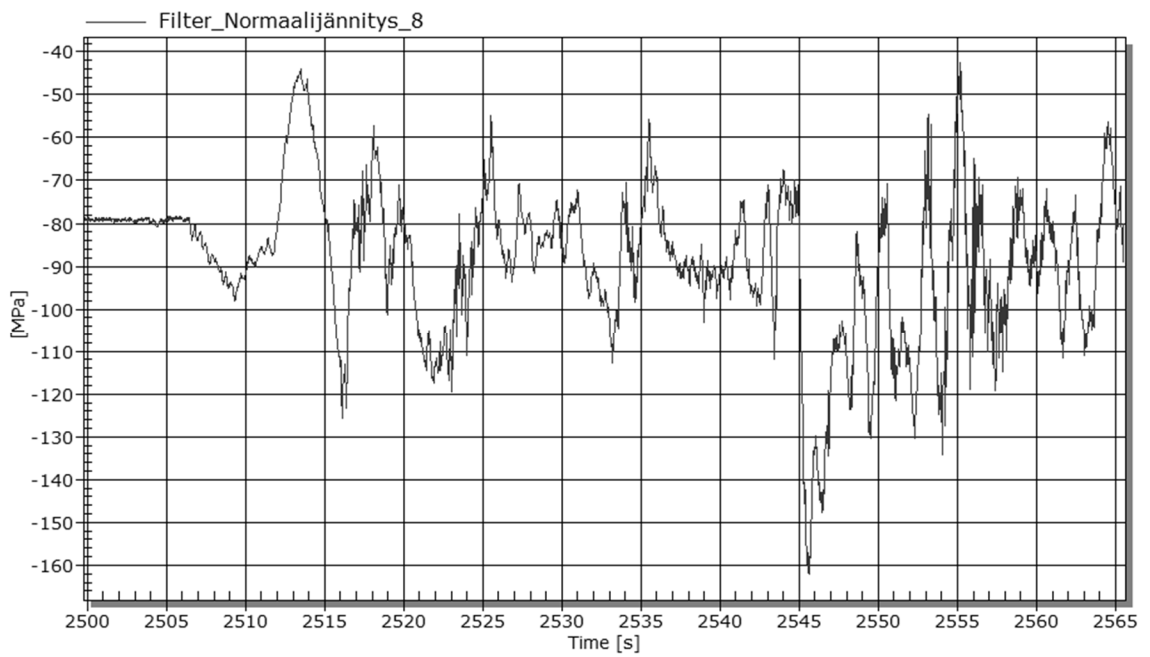
**Kuva 5** Käyttäytyminen hidasteessa sekä liikenneympyrässä. Mittauspiste 5.



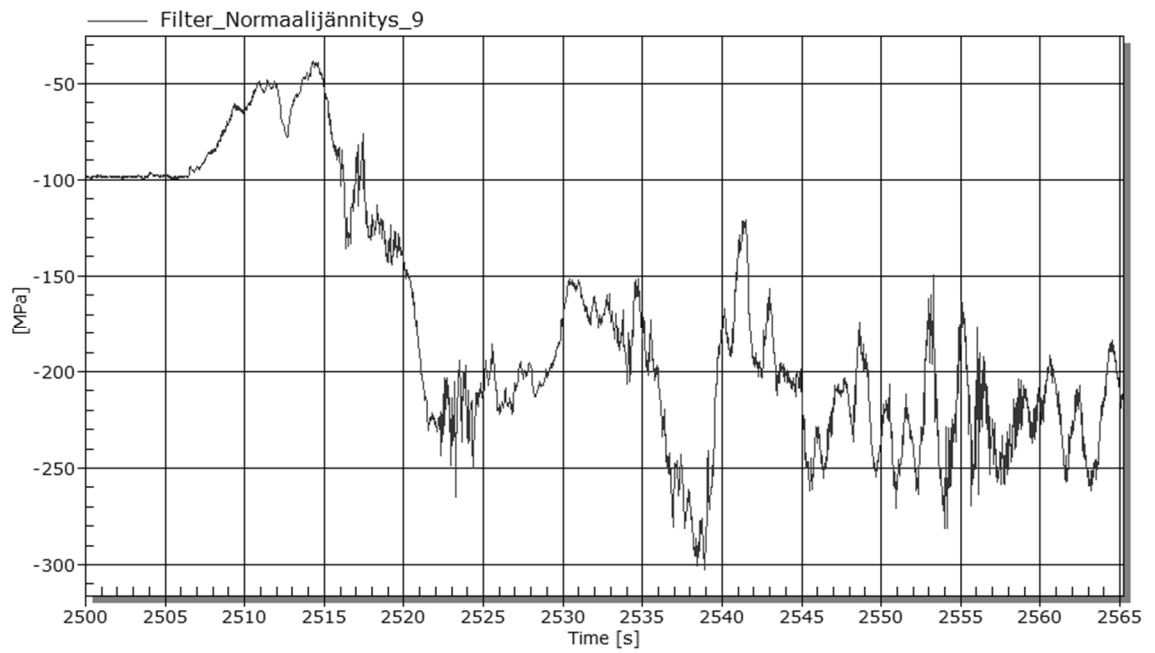
**Kuva 6** Käyttäytyminen hidasteessa sekä liikenneympyrässä. Mittauspiste 6.



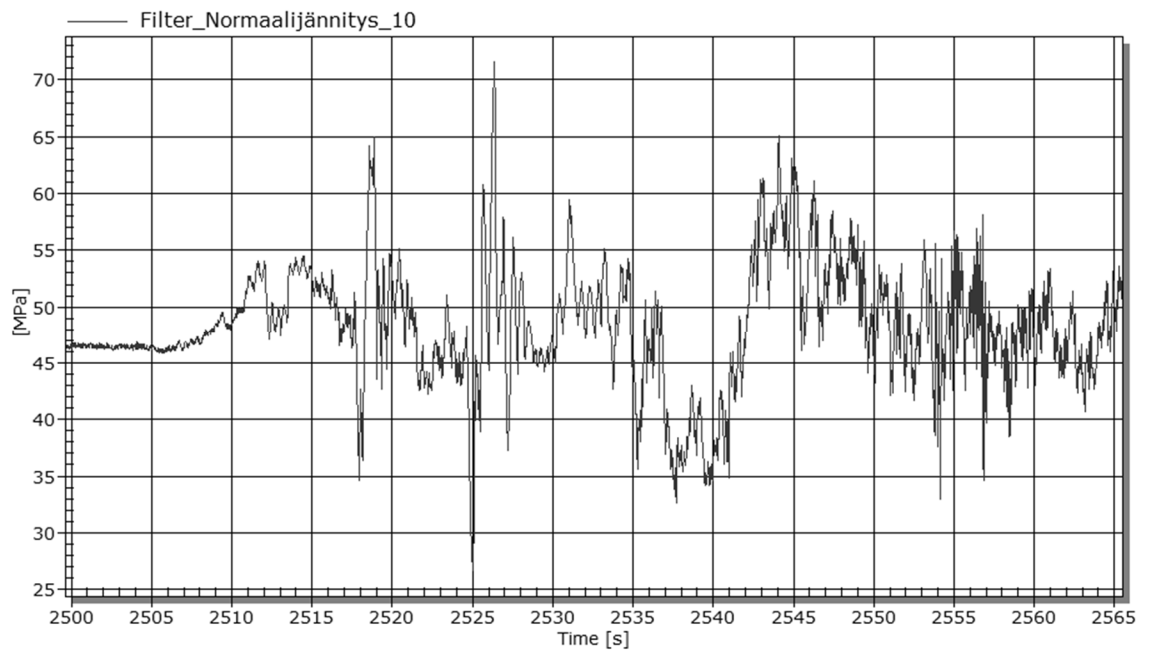
**Kuva 7** Käyttäytyminen hidasteessa sekä liikenneympyrässä. Mittauspiste 7.



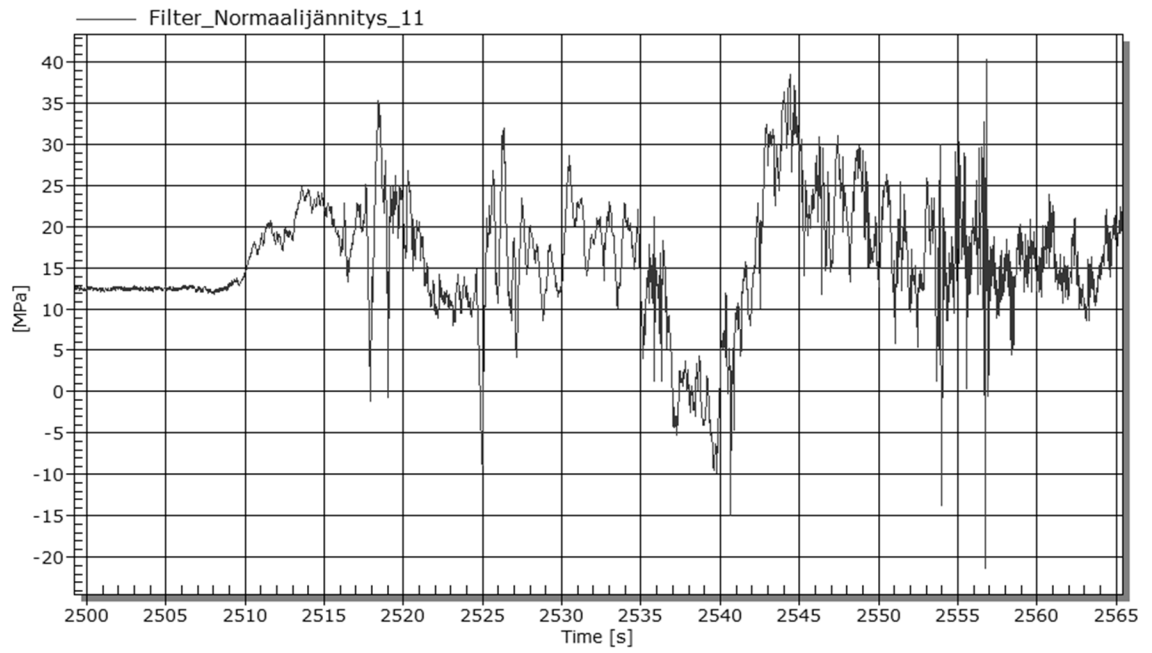
**Kuva 8** Käyttäytyminen hidasteessa sekä liikenneympyrässä. Mittauspiste 8.



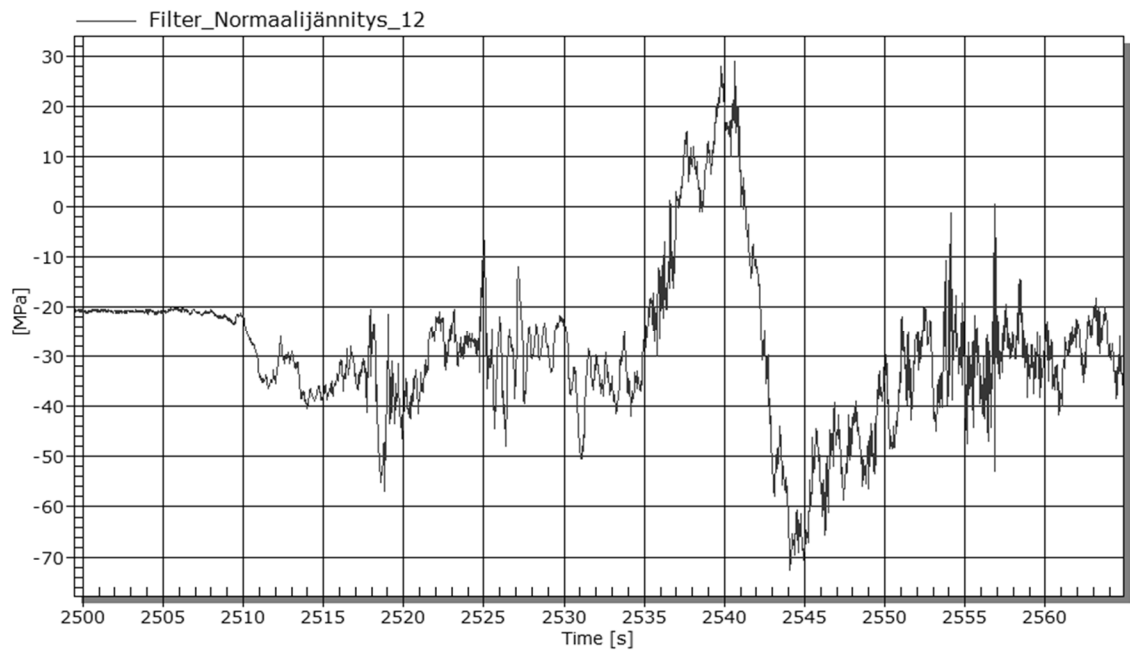
**Kuva 9** Käyttäytyminen hidasteessa sekä liikenneympyrässä. Mittauspiste 9.



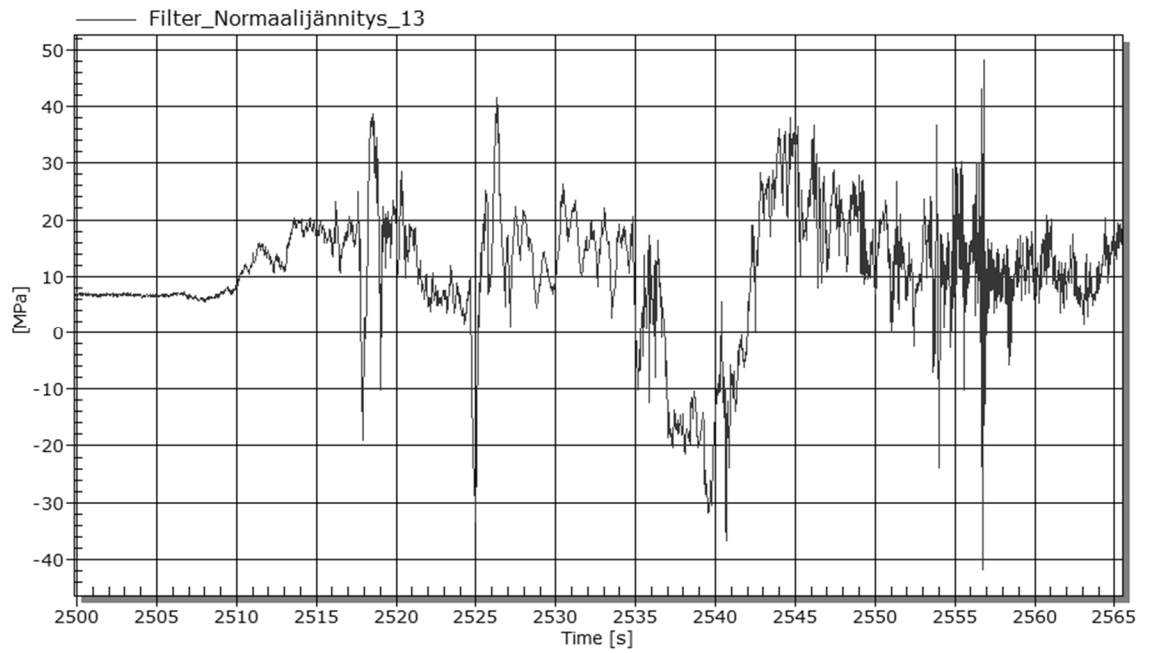
**Kuva 10** Käyttäytyminen hidasteessa sekä liikenneympyrässä. Mittauspiste 10.



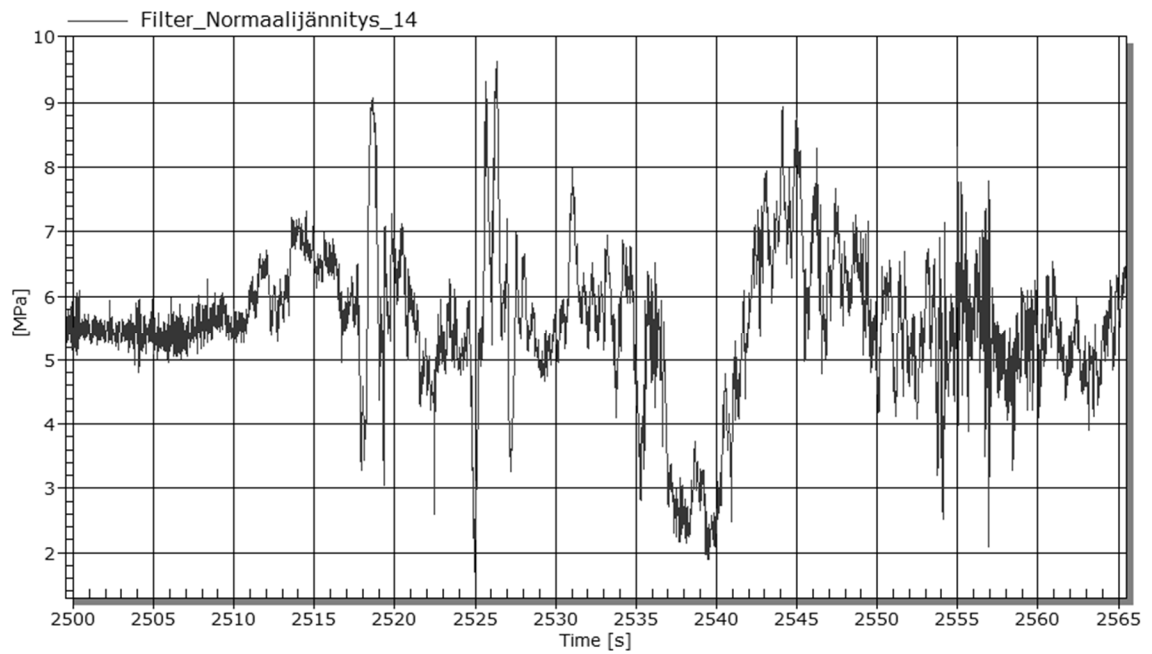
**Kuva 11** Käyttätyminen hidasteessa sekä liikenneympyrässä. Mittauspiste 11.



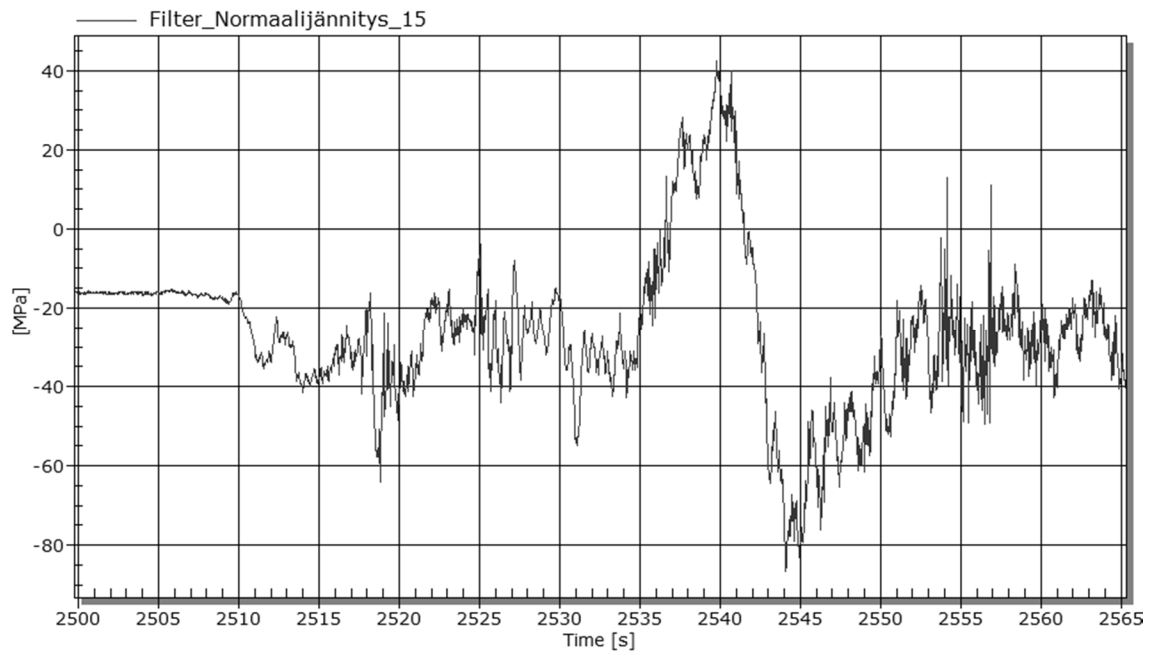
**Kuva 12** Käyttätyminen hidasteessa sekä liikenneympyrässä. Mittauspiste 12.



**Kuva 13** Käyttäytyminen hidasteessa sekä liikenneympyrässä. Mittauspiste 13.



**Kuva 14** Käyttäytyminen hidasteessa sekä liikenneympyrässä. Mittauspiste 14.



**Kuva 15** Käyttäytyminen hidasteessa sekä liikenneympyrässä. Mittauspiste 15.



**Kuva 16** Käyttäytyminen hidasteessa sekä liikenneympyrässä. Mittauspiste 16.



## LIITE 2: KUMULATIIVISET VAURIOT

Mittausohjelmasta Rainflow -analyysillä lasketut syklimäärät luokittain on esitetty taulukossa 1.

**Taulukko 1** Eri luokissa esiintyneiden syklien lukumäärät

<b>Luokka (MPa)</b>	<b>0-5</b>	<b>5-15</b>	<b>15-25</b>	<b>25-35</b>	<b>35-45</b>	<b>45-55</b>	<b>55-65</b>	<b>65-75</b>	<b>75-85</b>	<b>85-95</b>
Piste 1	9283	1142	80	17	0	0	0	0	0	0
Piste 2	8870	38147	1740	141	21	10	1	0	0	0
Piste 3	9274	2400	191	31	12	4	0	0	0	0
Piste 4	8999	17026	609	66	6	0	0	0	0	0
Piste 5	9189	6718	245	28	5	0	0	0	0	0
Piste 6	9250	1496	134	8	1	0	0	0	0	0
Piste 7	9311	56	0	0	0	0	0	0	0	0
Piste 8	8835	21175	2630	547	128	76	23	11	7	7
Piste 9	9297	147	62	47	38	24	12	12	8	226
Piste 10	8927	18571	332	38	6	1	0	0	0	0
Piste 11	9001	13087	730	64	9	0	0	0	0	0
Piste 12	9151	6966	284	52	17	6	2	0	0	0
Piste 13	8930	25027	1572	131	27	6	0	0	0	0
Piste 14	9302	617	1	0	0	0	0	0	0	0
Piste 15	9073	12837	727	109	31	13	7	4	0	0
Piste 16	9283	197	8	1	0	0	0	0	0	0

Alla on esitetty Minerin säännöllä laskettu kumulatiivinen vaurio jokaiselle mittauspisteelle.

Venymäliuska 1

$$D_1 = \sum_{i=j}^k \frac{n_i}{N_{fi}} = \frac{0}{10^8} + \frac{0}{2 * 10^7} + \frac{0}{5 * 10^6} + \frac{0}{2 * 10^6} + \frac{0}{6 * 10^5} + \frac{0}{3 * 10^5} = 0$$

Venymäliuska 2

$$D_2 = \sum_{i=j}^k \frac{n_i}{N_f} = \frac{1740}{10^7} + \frac{141}{2.5 * 10^6} + \frac{21}{8 * 10^5} + \frac{10}{5 * 10^5} + \frac{1}{3 * 10^5} + \frac{0}{2 * 10^5} + \frac{0}{1.5 * 10^5} + \frac{0}{10^5} = 2.8 * 10^{-4}$$

Venymäliuska 3

$$D_3 = \sum_{i=j}^k \frac{n_i}{N_{fi}} = \frac{12}{10^8} + \frac{4}{2 * 10^7} + \frac{0}{5 * 10^6} + \frac{0}{2 * 10^6} + \frac{0}{6 * 10^5} + \frac{0}{3 * 10^5} = 3.2 * 10^{-7}$$

Venymäliuska 4

$$D_4 = \sum_{i=j}^k \frac{n_i}{N_{fi}} = \frac{6}{10^8} + \frac{0}{2 * 10^7} + \frac{0}{5 * 10^6} + \frac{0}{2 * 10^6} + \frac{0}{6 * 10^5} + \frac{0}{3 * 10^5} = 5.0 * 10^{-8}$$

Venymäliuska 5

$$D_5 = \sum_{i=j}^k \frac{n_i}{N_{fi}} = \frac{245}{10^7} + \frac{28}{2.5 * 10^6} + \frac{5}{8 * 10^5} + \frac{0}{5 * 10^5} + \frac{0}{3 * 10^5} + \frac{0}{2 * 10^5} + \frac{0}{1.5 * 10^5} + \frac{0}{10^5} = 4.2 * 10^{-5}$$

Venymäliuska 6

$$D_6 = \sum_{i=j}^k \frac{n_i}{N_{fi}} = \frac{1}{10^8} + \frac{0}{2 * 10^7} + \frac{0}{5 * 10^6} + \frac{0}{2 * 10^6} + \frac{0}{6 * 10^5} + \frac{0}{3 * 10^5} = 10^{-8}$$

Venymäliuska 7

$$D_7 = \sum_{i=j}^k \frac{n_i}{N_{fi}} = \frac{0}{10^8} + \frac{0}{2 * 10^7} + \frac{0}{5 * 10^6} + \frac{0}{2 * 10^6} + \frac{0}{6 * 10^5} + \frac{0}{3 * 10^5} = 0$$

Venymäliuska 8

$$D_8 = \sum_{i=j}^k \frac{n_i}{N_{fi}} = \frac{128}{10^8} + \frac{76}{2 * 10^7} + \frac{23}{5 * 10^6} + \frac{11}{2 * 10^6} + \frac{7}{6 * 10^5} + \frac{7}{3 * 10^5} = 5.0 * 10^{-4}$$

Venymäliuska 9

$$D_9 = \sum_{i=j}^k \frac{n_i}{N_{fi}} = \frac{38}{10^8} + \frac{24}{2 * 10^7} + \frac{12}{5 * 10^6} + \frac{12}{2 * 10^6} + \frac{8}{6 * 10^5} + \frac{226}{3 * 10^5} = 7.7 * 10^{-7}$$

Venymäliuska 10

$$D_{10} = \sum_{i=j}^k \frac{n_i}{N_{fi}} = \frac{6}{10^8} + \frac{1}{2 * 10^7} + \frac{0}{5 * 10^6} + \frac{0}{2 * 10^6} + \frac{0}{6 * 10^5} + \frac{0}{3 * 10^5} = 1.1 * 10^{-7}$$

Venymäliuska 11

$$D_{11} = \sum_{i=j}^k \frac{n_i}{N_{fi}} = \frac{730}{10^7} + \frac{64}{2.5 * 10^6} + \frac{9}{8 * 10^5} + \frac{0}{5 * 10^5} + \frac{0}{3 * 10^5} + \frac{0}{2 * 10^5} + \frac{0}{1.5 * 10^5} + \frac{0}{10^5} = 1.1 * 10^{-4}$$

Venymäliuska 12

$$D_{12} = \sum_{i=j}^k \frac{n_i}{N_{fi}} = \frac{17}{10^8} + \frac{6}{2 * 10^7} + \frac{2}{5 * 10^6} + \frac{0}{2 * 10^6} + \frac{0}{6 * 10^5} + \frac{0}{3 * 10^5} = 8.7 * 10^{-7}$$

Venymäliuska 13

$$D_{13} = \sum_{i=j}^k \frac{n_i}{N_{fi}} = \frac{27}{10^8} + \frac{0}{2 * 10^7} + \frac{0}{5 * 10^6} + \frac{0}{2 * 10^6} + \frac{0}{6 * 10^5} + \frac{0}{3 * 10^5} = 2.7 * 10^{-7}$$

Venymäliuska 14

$$D_{14} = \sum_{i=j}^k \frac{n_i}{N_{fi}} = \frac{1}{10^7} + \frac{0}{2.5 * 10^6} + \frac{0}{8 * 10^5} + \frac{0}{5 * 10^5} + \frac{0}{3 * 10^5} + \frac{0}{2 * 10^5} + \frac{0}{1.5 * 10^5} + \frac{0}{10^5} = 1.0 * 10^{-7}$$

Venymäliuska 15

$$D_{15} = \sum_{i=j}^k \frac{n_i}{N_{fi}} = \frac{31}{10^8} + \frac{13}{2 * 10^7} + \frac{7}{5 * 10^6} + \frac{4}{2 * 10^6} + \frac{0}{6 * 10^5} + \frac{0}{3 * 10^5} = 4.3 * 10^{-7}$$

Venymäliuska 16

$$D_{16} = \sum_{i=j}^k \frac{n_i}{N_{fi}} = \frac{8}{10^7} + \frac{1}{2.5 * 10^6} + \frac{0}{8 * 10^5} + \frac{0}{5 * 10^5} + \frac{0}{3 * 10^5} + \frac{0}{2 * 10^5} + \frac{0}{1.5 * 10^5} + \frac{0}{10^5} = 1.2 * 10^{-6}$$

Taulukossa 2 on esitetty eri mittauspisteisiin yhden ajopäivän aikana syntynyt kumulatiivinen vaurio.

**Taulukko 2** Mittauspisteiden kumulatiivinen vaurio

<b>Piste</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>5</b>	<b>6</b>	<b>7</b>	<b>8</b>
<b>D<sub>i</sub></b>	0	2.8*10 <sup>-4</sup>	3.2*10 <sup>-7</sup>	5.0*10 <sup>-8</sup>	4.2*10 <sup>-5</sup>	10 <sup>-8</sup>	0	5.0*10 <sup>-4</sup>
<b>Piste</b>	<b>9</b>	<b>10</b>	<b>11</b>	<b>12</b>	<b>13</b>	<b>14</b>	<b>15</b>	<b>16</b>
<b>D<sub>i</sub></b>	7.7*10 <sup>-4</sup>	1.1*10 <sup>-7</sup>	1.1*10 <sup>-4</sup>	8.7*10 <sup>-7</sup>	5.7*10 <sup>-7</sup>	1.0*10 <sup>-7</sup>	4.3*10 <sup>-7</sup>	1.2*10 <sup>-6</sup>